



## On-line kontinuert måling af drikkevandskvalitet

Corfitzen, Charlotte B.; Albrechtsen, Hans-Jørgen

*Publication date:*  
2011

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Corfitzen, C. B., & Albrechtsen, H.-J. (2011). *On-line kontinuert måling af drikkevandskvalitet*. Naturstyrelsen. <http://www.naturstyrelsen.dk/NR/rdonlyres/0F9A275D-3762-41B6-B78E-11B993DDC977/122776/Onlinekontinuertmlingrapport2.pdf>

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

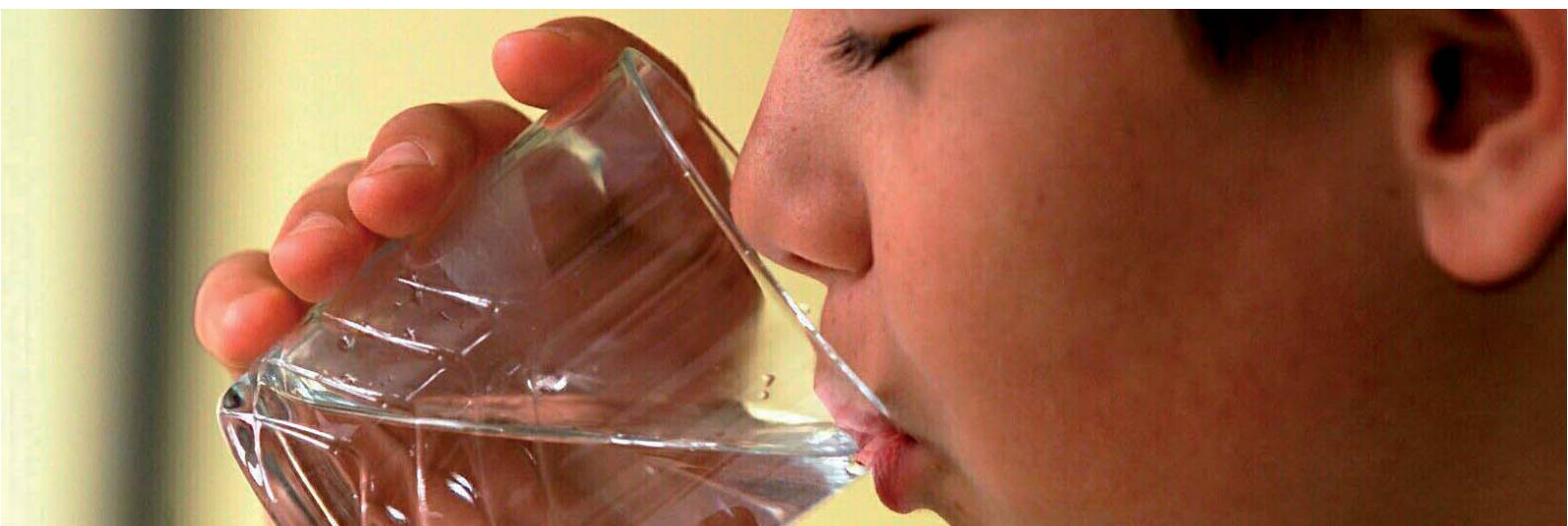
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



Miljøministeriet  
Naturstyrelsen

# On-line kontinuert måling af drikkevandskvalitet

2011



Titel:	On-line kontinuert måling af drikkevandskvalitet
Resumé:	Rapporten omhandler brug af on-line sensorer i drikkevandsforsyningen i Danmark. Fem forsyninger, der tilsammen repræsenterer ca. en fjerdel af det indvundet vandvolumen, har indrapporteret on-line sensorer i brug i 2009, og har leveret længere tidsserier (uger/måneder) af sensorresultater. Tidsserierne er analyseret, og årsagerne til udslagene i sensorsignalet er identificeres. Igennem intensive målekampagner er der undersøgt for korrelation mellem sensorsignal og mikrobiologiske parametre.
Forfattere:	Charlotte B. Corfitzen & Hans-Jørgen Albrechtsen, DTU Miljø
URL:	<a href="http://www.nst.dk">www.nst.dk</a>
ISBN:	978-87-92708-29-8
Udgiver:	Naturstyrelsen
Udgiverkategori:	Statslig
År:	2011
Sprog:	Dansk
Copyright©:	Må citeres med kildeangivelse. Naturstyrelsen, Miljøministeriet
Forbehold:	Naturstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter inden for miljøsektoren, finansieret af Naturstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Naturstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Naturstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.



# Indholdsfortegnelse

<b>FORORD</b>	<b>1</b>
<b>SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER</b>	<b>3</b>
<b>SUMMARY AND CONCLUSIONS</b>	<b>8</b>
<b>1 INDLEDNING</b>	<b>12</b>
1.1 FORMÅL	13
<b>2 ON-LINE SENSORER I FORSYNINGERNE</b>	<b>14</b>
2.1 HÅNTERING AF SENSORDATA	20
<b>3 SENSORTIDSSERIER FRA VANDVÆRKER</b>	<b>24</b>
3.1 VOGNSBØL VANDVÆRK, ESBJERG FORSYNING A/S	25
3.2 ÅBOVÆRKET, ÅRHUS VAND A/S	33
3.3 DALUMVÆRKET, VANDCENTER SYD A/S	38
3.4 SJÆLSØ VANDVÆRK, NORDVAND A/S	51
3.4.1 <i>Anlæg 1</i>	51
3.4.2 <i>Anlæg 2</i>	63
3.5 DISKUSSION AF SENSORTIDSSERIER FRA VANDVÆRKER	77
<b>4 SENSORTIDSSERIER FRA LEDNINGSNET</b>	<b>80</b>
4.1 DISKUSSION AF SENSORTIDSSERIER FRA LEDNINGSNET	93
<b>5 SENSORER OG MIKROBIOLOGISK KVALITET</b>	<b>94</b>
5.1 OPSTART AF FORFILTER EFTER RETURSKYL	95
5.1.1 <i>Målekampagne</i>	96
5.1.2 <i>Resultater</i>	96
5.2 IDRIFTSÆTTELSE AF LEDNINGSSTRÆKNING	99
5.2.1 <i>Målekampagne</i>	101
5.2.2 <i>Resultater</i>	102
5.3 DISKUSSION AF SENSORER OG MIKROBIOLOGISK KVALITET	105
<b>6 SAMLET DISKUSSION</b>	<b>106</b>
<b>7 KONKLUSION</b>	<b>108</b>
<b>8 REFERENCER</b>	<b>110</b>



# Forord

Projektet er udført af DTU Miljø - Institut for Vand og Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet i samarbejde med de fem vandforsyninger: Nordvand A/S, Københavns Energi A/S, VandCenter Syd A/S, Esbjerg Forsyning A/S og Århus Vand A/S.

Projektet er udført for og finansieret af By- og Landskabsstyrelsen under 'Udviklingspuljen til sikring af Danmarks fremtidige vandforsyning' repræsenteret ved Gunver Heidemann.

Projektgruppen har bestået af:

Charlotte B. Corfitzen og Hans-Jørgen Albrechtsen (DTU Miljø), Bo Lindhardt (Nordvand A/S), Ann-Katrin Pedersen (Københavns Energi A/S), Erling Nissen (VandCenter Syd A/S), Eric Lauridsen (Esbjerg Forsyning A/S) og Else-Marie Østergaard (Århus Vand A/S).

Tak til medarbejdere i vandforsyningerne, der har bidraget til fremskaffelsen af sensortidsserier og driftsinformationer samt være behjælpelige i forbindelse med målekampagnerne, specielt:

Nordvand A/S: Annika Lindholm, Elisabeth Hartelius, Ib Vagner, Kamilla Bach, Thomas Wollsen og Niels Johansen

Københavns Energi A/S: Niels Erik Bjergaarde

VandCenter Syd A/S: Erling Nissen, Dennis Arnsfeldt Pedersen, Rene From Hjorth og John Roche

Esbjerg Forsyning: Jørgen Stuber og Elvig Rasmussen

Århus Vand A/S: Thomas Vogn Kjeldsen og Knut Bjelke

Forfattere:

Charlotte B. Corfitzen, DTU Miljø

Hans-Jørgen Albrechtsen, DTU Miljø





# Sammenfatning og konklusioner

## On-line sensorer i dansk vandforsyning – hvad viser de?

Kan on-line sensorer til monitorering af turbiditet, ilt, ledningsevne, pH, temperatur, flow og tryk anvendes til overvågning og kontrol af drikkevandskvaliteten? On-line sensorer til monitorering af vandkvalitetsparametre sidder forsat fortrinsvis på vandværkerne i relativt begrænset antal, mens on-line sensorer til driftsparametre dominerer på ledningsnettet. Længere tidsserier af målinger fra danske vandforsyninger blev analyseret og viste, at udslag i signal kunne knyttes til driftsmæssige hændelser. Ved at kende sensormåling-profilen ved normaldrift, kan man identificere afvigelser, som vil kunne indikere en risiko for drikkevandskvaliteten. Sammenligning af sensormålinger og mikrobiologiske parametre ledte dog ikke til nogen simpel korrelation.

## Baggrund og formål

Den nuværende overvågning og monitorering af drikkevandskvalitet er baseret på udtagning af relativt få stikprøver om året, afhængigt af størrelsen af den producerede vandmængde. Ved pludselige forureninger er en sådan monitoringsstrategi desværre sjældent i stand til at detektere forureningen umiddelbart efter den er opstået, og er der tale om en kortvarig forurening eller blot en forureningspuls, der går igennem et ledningsnet, er der stor statistisk sandsynlighed for, at forureningen slet ikke detekteres.

Indholdet af det kommende drikkevandsdirektiv (forventet udgangen af 2010) kendes endnu ikke, men der er en forventning om, at det vil blive baseret på Water Safety Plans-principper. Det kan betyde, at end-of-pipe-monitorering (dvs. kontrolmåling ved vandhanen) forlades, og der i stedet lægges større vægt på at forebygge og monitorere de enkelte processer for at sikre, at de fungerer optimalt og derved hindre forringelse af vandkvaliteten. I denne sammenhæng er on-line monitorering helt central.

Projektet havde som overordnet formål at undersøge, hvorvidt on-line sensorer for række fysiske parametre fx: turbiditet, ledningsevne, pH, flow, tryk eller temperatur kan anvendes til at monitorere og sikre drikkevandskvaliteten.

Projektet havde tre delformål:

1. Skabe overblik over omfanget af brug af on-line sensorer i vandforsyningerne i Danmark, nu og i fremtiden
2. Belyse hvad der måles med on-line sensorer
3. Koble sensormålinger til mikrobiel drikkevandskvalitet

## Undersøgelsen

Vandforsyningerne Århus Vand A/S, Esbjerg Forsyning A/S, VandCenter Syd A/S, Nordvand A/S og Københavns Energi A/S deltog i projektet, og tilsammen repræsenterende de en fjerdedel af indvinding i Danmark.

Forsyningerne indrapporterede, hvad der var i brug af on-line sensorer i 2009, og hvad der er planlagt at tage i brug af yderligere sensorer i fremtiden. Længere tidsserier (uger/måneder) af sensormålinger blev sammenholdt med information om forsyning og drift for at årsagsidentificere udslag i sensorsignaler.

Målekampagner blev udført ved hændelser, som forventedes at give udslag på sensormålinger, med sammenligning af on-line sensormålinger og mikrobiel analyse af vandprøver udtaget med høj frekvens.

## **Hovedkonklusioner**

### **Sensorpark:**

- Sensorer til at monitorere vandkvalitetsparametre er fortrinsvis placeret på vandværkerne, men fortsat i et relativt begrænset antal: Turbiditet (15 værker), ilt (4 værker), ledningsevne (2 værker) og pH (2 værker)
- På ledningsnettet er der næsten udelukkende installeret sensorer til at monitorere driftsparametre som flow, tryk og temperatur – i nogle forsyninger i alle brønde, i andre i en mindre andel – er et stærkt driftsværktøj til fx lækagesøgning
- Alle forsyninger planlægger udvidelse af sensorparken i fremtiden
- Der er stor variation imellem forsyninger på logningsinterval, format for at gemme sensormålinger som historiske data, og hvor tilgængelige disse data er

### **Analyse af tidsserier:**

- Udslag i sensormålinger på vandværker under normaldrift kunne knyttes til en driftmæssig aktivitet
- Sensormåling-profiler påvirkes forskelligt af driften fra vandværk til vandværk, og der må derfor udfærdiges en profil for normaldriften for det enkelte værk
- Det er teoretisk muligt at forudse udslag i sensormålinger som følge af normaldrift og derved identificere afvigelser
- On-line monitoring af fysiske parametre som flow, tryk og temperatur i forsyningernes ledningsnet udgør stærkt værktøj til driftskontrol af ledningsnettet (fx lækagesøgning)

### **Sensormåling og mikrobiologisk vandkvalitet:**

- Ingen simpel korrelation imellem sensormåling og mikrobiologisk vandkvalitet ved målekampagner ved lave mikrobiologiske niveauer
- Pludselig ændring i sensorsignal indikerer en ændring i systemet, der alt andet lige kan udgøre en risiko for den mikrobiologiske drikkevandskvalitet

For at få det fulde udbytte af on-line sensorer til kontrol og overvågning bør målingerne følges af driftspersonalet og kobles til årsagshændelser, og erfaringerne forankres i løbende sammenfatninger. Af hensyn til ressourcer og tilgængelighed bør dette være et automatisk forløb via en software funktion, fx som ugentlige rapporter til driftsledelsen – sådan software er enten endnu ikke tilgængelig eller også ligger det som en funktion i SRO-systemer, der i dag blot ikke anvendes.

## Projektræsultater

Forsyningerne benytter on-line sensorer til at overvåge drift og processer på vandværkerne. Man har først og fremmest ønsket at skabe sig et erfaringsgrundlag: hvordan ser sensormåledata ud? Hvad er det man ser på målingerne? og hvad kan man bruge det hele til? Når der er opnået forståelse for, hvad man kan udlede af målingerne, vil det give større klarhed over, hvad man kan bruge dem til og hvordan man skal forholde sig til dem. Optællingen af on-line sensorer i forsyningerne i 2009 er opsummeret i Tabel A.

Tabel A: Opsummering af hvilke sensorer, der i drift hvor i projektets forsyninger.

Sensor	Antal vandværker (Antal forsyninger)	Antal placeringer på Ledningsnet (Antal forsyninger)
Turbiditet	15 (5)	1 på pumpestationer (1)
Ledningsevne	2 (1)	1 på råvandsledning 1 i brønd (1)
pH	2 (1)	1 i brønd (1)
Ilt	4 (4)	1 i brønd (1)
Tryk	8 (2)	I 8 brønde (1) I 55 brønde (1) I 60 brønde (1) I 19 brønde (1)
Flow	11 (3)	2 på ledningsnet (1) 1 på pumpestation (1) 4 i vandtårne (1) I 55 brønde (1) I 60 brønde (1) I 19 brønde (1)
Temperatur	2 (2)	I 8 brønde(1) I 55 brønde(1) I 60 brønde(1) 1 på råvandsledning (1)

Vandforsyningerne har i dag i større eller mindre udstrækning deres produktion (indvindinger og vandværker) og forsyningsnet indlagt i SRO-systemer (Styring-Regulering-Overvågning). Disse systemer leveres fra et større antal udbydere og varierer i funktionalitet, brugervenlighed samt kapacitet, og er et marked i hastig udvikling. Teoretisk kan en hel forsyning styres centralt via SRO-systemet.

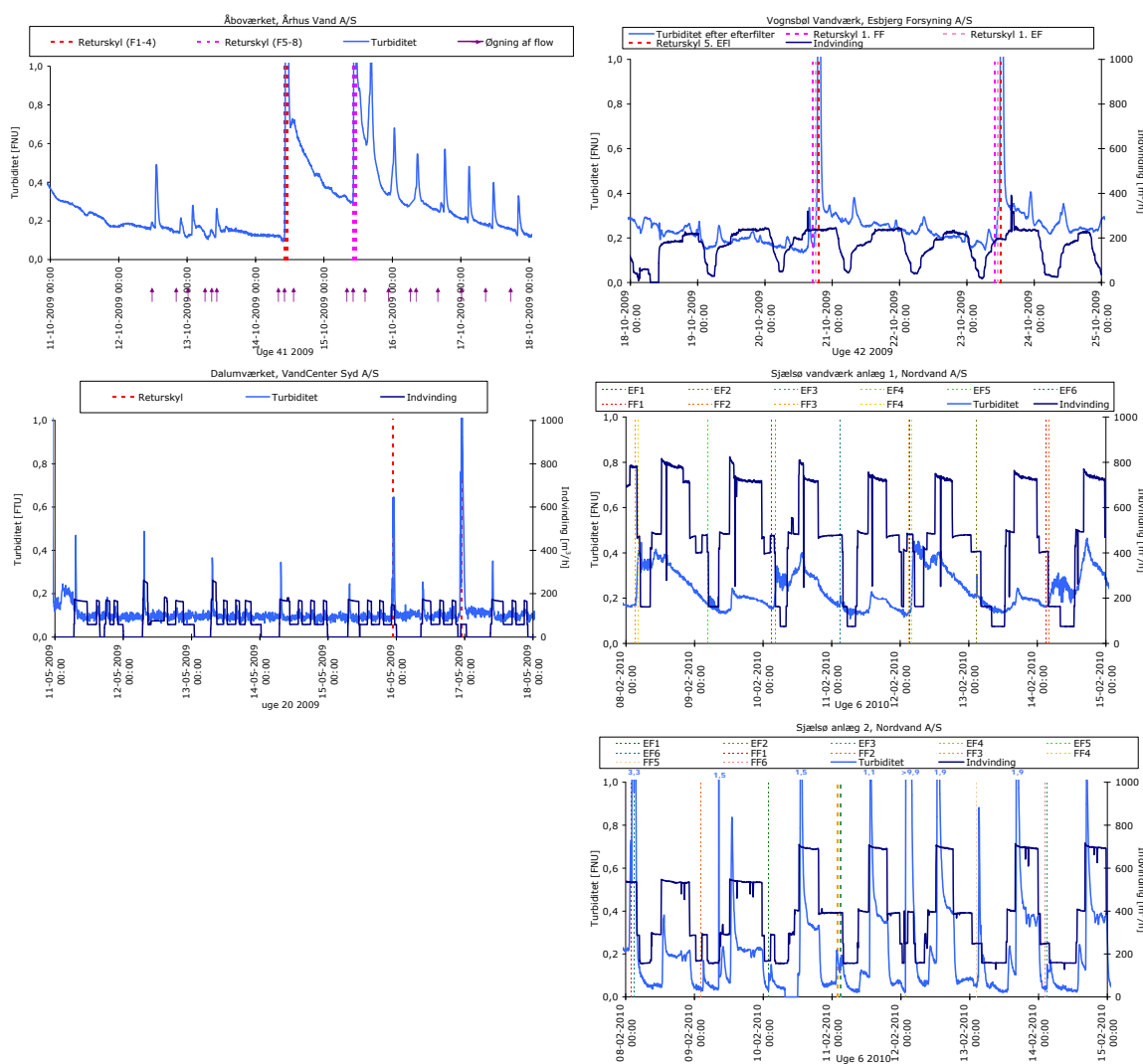
Nogle forsyninger gemmer sensormålinger med den loggede intensitet (alle måledata), mens andre kun gemmer værdier midlet over et længere tidsinterval (fx 1 time). Analysen af tidsserier indikerede, at middelværdier for 5 min logningsperioder giver acceptable balance imellem datamængde og information om tidsmæssig placering og størrelse af signal udslag. Nogle forsyninger gemmer deres måledata i mange år, andre kun i få dage eller slet ikke, og således var potentialet for at anvende historiske måledata varierende.

Analyse af tidsserier viste, at udslag i sensormålinger kunne kobles til driftsmæssige hændelser, eksempelvis:

- Toppe i turbiditet:
  - Øget filterbelastning ved øget indvindingsflow, eller hvis et filter tages ud af produktion ved returskyl
  - Opstart af filtre efter returskyl

- Toppe i ilt: Ved opstart af filtre efter returskyl med luft, når luft fanget i filtret skylles ud
- Variationer i ledningsevne: Ved ændring i boringskombinationer

Effekten af driftshændelser og dermed sensormåling-profiler varierede mellem vandværker, og det er således nødvendigt at etablere en årsag-effekt sammenhæng for det enkelte vandværk. Figur A giver eksempel på forskel på turbiditetsprofiler imellem 5 vandværker.



Figur A: Eksempler på forskel i turbiditetsprofil (for en uge) monitoreret efter filtre på 5 værker.

Online målinger blev sammenlignet med mikrobiologiske analyser af vandprøver udtaget med høj intensitet. Der blev målt over to hændelser:

1. Opstart af filter efter returskyl
2. Idriftsættelse af ledningsstrækning på ledningsnettet

De mikrobiologiske niveauer var generelt lave ved begge hændelser. Det kunne konstateres, at et pludseligt udslag i sensormålinger ligeledes kunne genfindes som et udslag i mikrobiologiske værdier, men der kunne ikke opstilles en simpel korrelation imellem sensormålinger og mikrobiologiske parametre. Det kan således ikke fastlægges en værdi for sensormålinger, hvorunder den mikrobiologiske vandkvalitet kan garanteres. På den anden side vil en pludselig ændring i sensormålinger indikere en ændring, der kan påvirke den mikrobiologiske vandkvalitet.



# Summary and conclusions

## On-line sensors in Danish water supply – what do they show?

Can on-line sensors for monitoring of turbidity, oxygen, conductivity, pH, temperature, flow and pressure be used for surveillance and control of drinking water quality? On-line sensors for quality parameters are mainly installed at the water works in relatively limited numbers, while on-line sensors for operational parameters dominate during distribution. Longer time series of measurements from Danish water supplies showed fluctuations in signal coupled to operational actions. Knowing the sensor measurement profile for normal operation, deviations can be identified which might constitute a risk for the quality. Comparing sensor measurement and microbial parameters did not reveal any simple correlation.

## Background and purpose

The current surveillance and monitoring of drinking water quality is based on relatively few grab samples per year, depending on the produced water volume. Unfortunately, this monitoring strategy will only in rare case register an contamination immediately after its introduction, and short term contaminations or contamination pulses in the distribution network possible would not be detected at all.

The future drinking water directive (expected by the end of 2010) is not yet known, but it is expected to be based on Water Safety Plans principles. This will probably lead to an end of end-of-pipe-monitoring, and instead emphasis will be put on precautions and monitoring of the processes to ensure that they function optimally and thus hinder deterioration of the water quality. In this context on-line monitoring plays a central role.

The overall goal of the project was to investigate if on-line sensors for a number of physical parameters e.g.: turbidity, conductivity, pH, flow, pressure or temperature can be used to monitor and secure the drinking water quality.

The project had three sub goals:

1. To create an overview over the use of on-line sensors in Danish water supply, today and in the future
2. To elucidate what is measured by on-line sensors
3. To correlate sensor measurements with microbial drinking water quality

## The investigation

The water supplies Århus Vand A/S, Esbjerg Forsyning A/S, VandCenter Syd A/S, Nordvand A/S and Københavns Energi A/S participated in the project, together representing one fourth of the abstracted water volume in Denmark.

The water supplies reported on-line sensors in use in 2009 and planned for the future.

Longer time series (weeks/months) of sensor measurements were compared with information about the supplies and their operation to identify causes for fluctuations in signals.

Measurement campaigns were performed during events expected to give fluctuations in sensor signals, and on-line sensor measurements were compared with microbial analysis of water sampled with high frequency.

## **Main conclusions**

Sensor park:

- Sensors for monitoring of quality parameters are mainly installed at the water works and in relatively low numbers: turbidity (15 works), oxygen (4 works), conductivity (2 works) and pH (2 works)
- In the distribution are nearly solely installed sensors for monitoring of operational parameters: flow, pressure and temperature – in all or part of the supplies' man holes – serving as a strong operational tool
- All supplies are planning to extent the number of on-line sensors
- Large variation between the supplies with regard to logging intensity, format for historical data storage, and accessibility of the data

Analysis of time series:

- Fluctuations in sensor measurement at the water works during normal operation were correlated to operational actions
- The operational actions effect on sensor measurement profile varied between works - profiles for the normal operation must be established for each individual water works
- Response on sensor measurements of actions during normal operation can be predicted, and thus identify deviations
- On-line monitoring of physical parameters: flow, pressure and temperature is a strong tool for operation control in the distribution (e.g. identification of pipe leakage)

Sensor measurements and microbial water quality:

- No direct correlation between sensor measurements and microbial quality was found at measuring campaigns – mainly due to low microbial levels
- Sudden fluctuations in sensor signal indicate changes in system, which might deteriorate the microbial water quality

For optimal use of on-line sensors for control and surveillance, water works staff must monitor the measurements and relate them to operational actions and the knowledge should be continuous anchored by summary reports. Keeping resources and availability in mind, such reports should to be compiled atomically by a software function – such software is either not available or lies as an unused function within the operation-systems.

## **Project results**

The water supplies have started using on-line sensors for monitoring operations and processes at the water works. Initially it has been the aim to establish a knowledge base: who does sensor measurements look? What do the measurements show? And what can it all be used for? When an understanding of the measurements has been established, it would be more

obvious what to be seen and how to relate to it. The counting of on-line sensors in the supplies in 2009 is summarized in Table A.

Table A: Summary of on-line sensors in use and where in water supplies participating in the project.

Sensor	Number of water works (Number of supplies)	Number in distribution system (Number of supplies)
Turbidity	15 (5)	1 at pumping station (1)
Conductivity	2 (1)	1 at raw water pipe 1 in man hole (1)
pH	2 (1)	1 in man hole (1)
Oxygen	4 (4)	1 in man hole (1)
Pressure	8 (2)	In 8 man holes (1) In 55 man holes (1) In 60 man holes (1) In 19 man holes (1)
Flow	11 (3)	2 in distribution system (1) 1 at pumping station (1) 4 in elevated tanks(1) In 55 man holes (1) In 60 man holes (1) In 19 man holes (1)
Temperature	2 (2)	In 8 man holes(1) In 55 man holes (1) In 60 man holes(1) 1 at raw water pipe (1)

Today the water supplies integrate more or less of their production (abstraction and water works) and distribution systems in operation-systems. These systems are available from many suppliers and vary in functionality, user-friendliness and capacity, and the market is rapid developing. Theoretically, an entire water supply can be controlled centrally via the operation-system.

Some water supplies store the sensor measurements at the logged intensity (all measurements) while others only save values averaged over a longer time interval (e.g. an hour). Analysis of time series indicated that values averaged over 5 min give acceptable balance between amount of data and information on the duration and size of fluctuations. Some supplies save their measured values for years, others only for few days or not at all, and thus the potential for using historical data is varying.

Fluctuations in sensor measurements could be coupled to operational actions, e.g.:

- Peaks in turbidity:
  - Increase in filter load by increased abstraction flow or by decoupling a filter for backwash
  - Start-up of filters after backwash
- Peaks in oxygen after filters: at start-up, after backwash with air, when trapped within the filter was flushed out
- Variations in conductivity: change in well combination

The effect of operational actions and thereby the sensor measurement profile varied between water works, and it is thus necessary to establish en cause-



effect identification for the individual water works. Figure A gives examples of turbidity profiles of 5 water works.

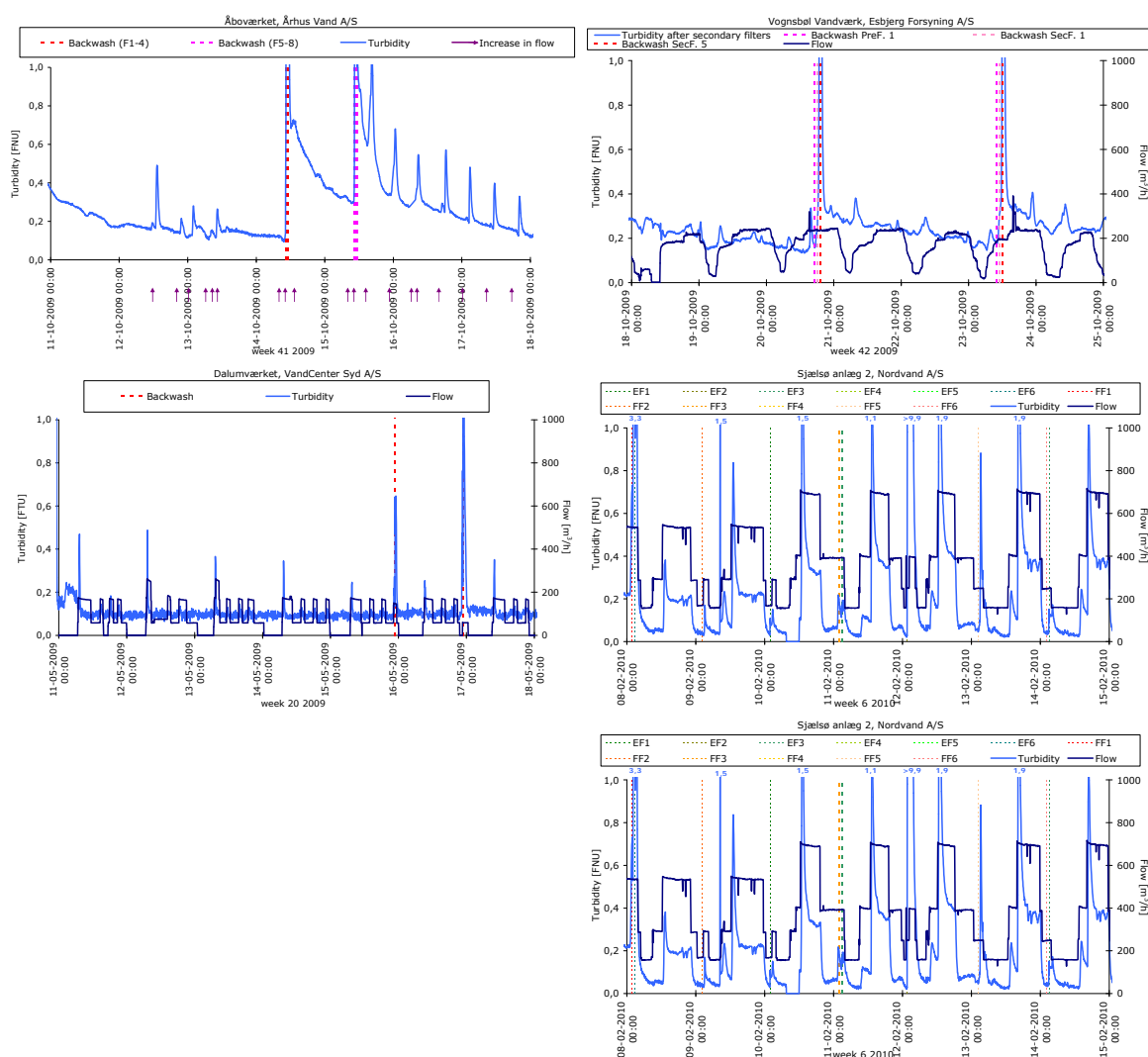


Figure A: Examples of turbidity profiles (one week period) monitored after the filters at 5 water works.

On-line measurements were compared with microbial analyses of water sampled at high intensity. Measurements were performed during two events:

1. Start-up of a filter after backwash
2. Taking a pipe section of distribution system into operation

The microbial levels were generally low during both events. A sudden fluctuation in sensor measurements was accompanied by a sudden fluctuation in microbial parameters, but a simple correlation between sensor measurements and microbial parameters could not be established. Thus a specific value for the sensor measurements below which the microbial quality can be assured could not be established. On the other hand, a sudden fluctuation in sensor measurements indicates a change within the system, which may affect the microbial quality of the water.

# 1 Indledning

Den nuværende overvågning og monitorering af drikkevandskvalitet er baseret på udtagning af relativt få stikprøver om året, afhængig af størrelsen af den producerede vandmængde. Ved pludselige forureninger er en sådan monitoringsstrategi desværre sjældent i stand til at detektere forureningen umiddelbart efter den er opstået, og er der tale om en kortvarig forurening eller blot en forureningspuls, der går igennem et ledningsnet, er der stor statistisk sandsynlighed for, at forureningen slet ikke detekteres (Boe-Hansen et al., 2003), selv om den udgør en sygdomsrisiko. En on-line monitorering af drikkevandskvalitet burde kunne detektere forureninger umiddelbart efter, de er opstået, og straks sende en alarm til vandforsyningen, så større gener for forbrugerne kan undgås. Ved kontinuert monitorering burde også kortvarige forureninger kunne detekteres.

Indholdet af det kommende drikkevandsdirektiv (forventet udgangen af 2010) kendes endnu ikke, men der er en forventning om, at det vil blive baseret på Water Safety Plans-principper. Det kan betyde, at end-of-pipe-monitoring (dvs. kontrolmåling ved vandhanen) forlades, og der i stedet lægges større vægt på at forebygge og monitorere de enkelte processer for at sikre, at de fungerer optimalt og derved hindre forringelse af vandkvaliteten. I denne sammenhæng er on-line monitorering helt central.

On-line monitorering har en lang række fordele: Der er ikke behov for, at en prøvetager skal ud og hente en prøve, resultatet foreligger stort set med det samme (real-time), idet der ikke indgår tidskrævende laboratorieanalyser med lange inkubationstider, signalet overføres elektronisk (on-line), hvorved risikoen for fejl minimeres, og endelig er det muligt at monitorere med høj målefrekvens (kontinuert). Dette forudsætter naturligvis, at sensorerne er tilstrækkeligt robuste, pålidelige og følsomme.

Der er en del kommercielle sensorer på markedet til måling af fysiske parametre, fx til måling af turbiditet, ledningsevne, flow, tryk og temperatur. Imidlertid er ingen af disse parametre umiddelbart udtryk for en væsentlig drikkevandskvalitet, men der er på nuværende tidspunkt desværre stort set ingen sensorer tilgængelige, der kan monitorere kritiske parametre som fx mikrobiologiske parametre eller giftige stoffer. Indtil sådanne er kommercielt tilgængelige, kan sensorer til måling af fysiske parametre sandsynligvis være nyttige som 'proxy'-måling for ændringer i systemet.

On-line måling vil på længere sigt kunne benyttes til aktiv styring og kontrol af behandlingsprocesser og distribution af drikkevand. I dag anvendes fx i nogle forsyninger niveaumålere i rentvandstanke og højdebeholdere til at styre indvinding fra borer. En on-line måling af fx turbiditet vil også kunne benyttes til at vurdere, hvornår returskylning af filtre er nødvendig, eller om en returskylning har været tilstrækkeligt effektiv.

På en række større vandforsyninger er on-line monitorering under implementering, herunder Århus Vand A/S, Esbjerg Forsyning A/S, VandCenter Syd A/S, Nordvand A/S og Københavns Energi A/S. Der er således ved at blive opbygget forskellige erfaringer med on-line måling, men hvad

præcis er det, sensorsignalet viser? hvad forårsager en variation i sensorsignal? og hvornår er en variation i sensorsignal alarmerende?

Der er således grundlag for at opsamle erfaringerne, der kan komme hele branchen til gode og undgå spild af ressourcer ved, at hver enkelt forsyning hver især skal starte fra bunden.

## 1.1 Formål

Projektet havde som overordnet formål at undersøge, hvorvidt on-line sensorer for række fysiske parametre fx: Turbiditet, ledningsevne, pH, flow, tryk eller temperatur kan anvendes til at monitere og sikre drikkevandskvaliteten. Projektet involverede vandforsyningerne Århus Vand A/S, Esbjerg Forsyning A/S, VandCenter Syd A/S, Nordvand A/S og Københavns Energi A/S.

Projektet havde tre delformål:

4. Skabe overblik over omfanget af brug af sensorer i vandforsyningerne, nu og i fremtiden, ved at indsamle informationer fra de involverede vandforsyninger om ibrugtaget og planlagte sensorer.
5. Belyse hvad der kan måles med sensorerne ved at sammenholde længere tidsserier (uger-måneder) fra udvalgte sensorer i vandforsyningerne med information om vandforsyningerne, deres drift og vandkvalitetsdata for årsagsidentifikation (fx returskyl, boringsskift), herunder en vurdering af hvornår signalerne skal tillægges en værdi og hvornår, der er tale om naturlig variation eller målestøj.
6. Koble sensormålinger til mikrobiel drikkevandskvalitet ved at udføre intensive målekampagner, hvor sensormålinger sammenholdes med mikrobiel analyse af vandprøver udtaget med høj frekvens ved hændelser, som forventedes at give udslag på sensormålingerne.

## 2 On-line sensorer i forsyningerne

Fem af de største vandforsyninger i Danmark, tilsammen repræsenterende omkring en fjerdedel af den samlede danske indvinding, har bidraget med informationer om sensorer og sensormålinger til projektet: Århus Vand A/S (AV), Esbjerg Forsyning A/S (EF), VandCenter Syd A/S (VCS), Nordvand A/S (NV) og Københavns Energi A/S (KE). De er alle inden for de sidste 10-15 år begyndt at anvende on-line sensorer i større eller mindre udstrækning. Sensorerne er placeret på vandværkerne og i brønde på ledningsnettet. Forsyningerne har indrapporteret<sup>1</sup>, hvad der i 2009 sad i ude i forsyningerne af on-line sensorer, hvilket dækker sensorer af flere forskellige fabrikater til måling af turbiditet, ledningsevne, pH, flow, tryk, temperatur, ilt og et enkelt sted hos KE et UV,VIS spektrofotometer (oversigt over sensorer, placering i forsyningerne og logningsformat i Tabel 1-Tabel 8).

Tabel 1: Turbiditetssensorer i drift i projektets vandforsyninger.

Turbiditet					
Vand-forsyn.	Placering	Mærke	Ibrugtaget	Lognings-interval	Datalogning
KE	Afgang Regnemark vandværk	Great Lakes model T53 Analyzer	1998	i.o.	Registreres i SRO-system, slettes efter 3 døgn *
	Afgang Lejre vandværk	Hach Lange Ultraturb plus (Great Lakes)	2008 (fra 1998)	i.o.	Registreres i SRO-system, slettes efter 3 døgn *
	Afgang Marbjerg vandværk	Hach Lange Ultraturb plus (Great Lakes)	2008 (fra 1998)	i.o.	Registreres i SRO-system, slettes efter 3 døgn *
	Afgang Thorsbo vandværk	Great Lakes model T53 Analyzer	1998	i.o.	Registreres i SRO-system, slettes efter 3 døgn *
	Afgang Islevbro vandværk	Hach Lange Ultraturbplus (Great Lakes)	2008 (fra 1998)	i.o.	Registreres i SRO-system, slettes efter 3 døgn *
	Afgang Søndersø vandværk	Hach Lange Ultraturb plus (Great Lakes)	2008 (fra 1998)	i.o.	Registreres i SRO-system, slettes efter 3 døgn *
	Afgang Slangerup vandværk	Great Lakes model T53 Analyzer	1998	i.o.	Registreres i SRO-system, slettes efter 3 døgn *
	Islevbro vandværk – genbrugsanlæg filterskyl	WTW Vioturb 700 IQ	2006	i.o.	Tilsluttes PLC der driftstyrer
	Thorsbo vandværk – genbrugsanlæg filterskyl	Hach Lange Ultraturb plus	2008	i.o.	Tilsluttes PLC der driftstyrer
	4 mobile enheder	Hach Lange Ultraturb plus	2005	i.o.	Lokal datalogning

Tabel fortsættes næste side

<sup>1</sup> Kun Gentofte-delen af Nordvand A/S indgik i indberetningen.

Tabel fortsat fra forrige side

NV	Afgang anlæg 1, Sjælsø vandværk	Hach Lange ultraturb SC100	i.o.	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som time-værdier i mange år
	Afgang anlæg 2, Sjælsø vandværk	Hach Lange ultraturb SC100	i.o.	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som time-værdier i mange år
	Afgang Ermelunds-værket	Hach Lange ultraturb SC100	i.o.	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som time-værdier i mange år
	Afgang fælles rentvandstank, Sjælsø vandværk (afgang mod Gentofte)	Hach Lange ultraturb SC100	i.o.	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som time-værdier i mange år
	Indgang Lundtofte pumpestation	Hach Lange ultraturb SC100	i.o.	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som time-værdier i mange år
VCS	Samlede flow afgang filtre, Dalumværket	WTW, Fagerberg	2003	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 sek-værdier i mange år
	Samlede flow afgang filtre, Lundeværket	WTW, Fagerberg	2003	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 sek-værdier i mange år
AV	Afgang Stautrup-værket	i.o.	Marts 2009	10 min	Registreres i SRO-system, gemmes som 10 min-værdier
	Vekslende filterafgange, Åbroværket (mobilt udstyr)	Hach Lange Ultraturb 6, LPV415	Februar 2009	5 min	Lokal datalogning, alle data som 5 min-værdier gemmes
EF	Afgang efterfilter Vognsbøl Vandværk	Ultraturb-sc plus SC1000	Juni 2009	1 min	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 min-værdier i flere år
	Afgang værk Vognsbøl Vandværk	Ultraturb-sc plus SC1000	Juni 2009	1 min	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 min-værdier i flere år

\* SRO-system planlægges påbegyndt udskiftet i 2009, så data kan gemmes længere.  
i.o.: ikke oplyst.

Tabel 2: Ledningsevnesensorer i drift i projektets vandforsyninger.

Ledningsevne					
Vand-forsyn.	Placering	Mærke	Ibrugtaget	Lognings-interval	Datalogning
VCS	Efter pumpe afgang rentvandstank Dalumværket	WTW, Fagerberg	2003	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 sek-værdier i mange år
	Efter pumpe afgang rentvandstank Lundeværket	WTW, Fagerberg	2003	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 sek-værdier i mange år
KE	Tipperup bygningsværk (råvandsledning)	WTW Tetracon 700 IQ	Juni 2009	i.o.	Registreres i SRO-system, slettes efter 3 døgn *
	Ejby bygværk (ledningsnet)	WTW	September 2009	i.o.	Data logges og sendes via GPRS til server PC

\* SRO-system planlægges påbegyndt udskiftet i 2009, så data kan gemmes længere.  
i.o.: ikke oplyst.

Tabel 3: pH-målere i drift i projektets vandforsyninger.

pH					
Vand-forsyn.	Placering	Mærke	Ibrugtaget	Lognings-interval	Datalogning
VCS	Efter pumpe afgang rentvandstank, Dalumværket	WTW, Fagerberg	2003	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 sek-værdier i mange år
	Efter pumpe afgang rentvandstank, Lundeværket	WTW, Fagerberg	2003	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 sek-værdier i mange år
KE	Ejby bygværk (ledningsnet)	WTW	September 2009	i.o.	Data logges og sendes via GPRS til server PC

i.o.: ikke oplyst

Tabel 4: Iltsensorer i drift i projektets vandforsyninger.

Ilt					
Vand-forsyn.	Placering	Mærke	Ibrugtaget	Lognings-interval	Datalogning
VCS	Samlede flow efter filtre Dalumværket	WTW, Fagerberg	2003	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 sek-værdier i mange år
	Samlede flow efter filtre Lundeværket	WTW, Fagerberg	2003	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 sek-værdier i mange år
AV	Afgang Stautrup-værket	i.o.	Marts 2009	15 min	Registreres i SRO-system, gemmes som 15 min-værdier
KE	Ejby bygværk (ledningsnet)	WTW	September 2009	i.o.	Data logges og sendes via GPRS til server PC
EF	Efter iltning Vognsbøl Vandværk	Hach Lange type LDO	i.o.	1 min	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 min-værdier i flere år
i.o.: ikke oplyst					

Tabel 5: Tryksensorer i drift i projektets vandforsyninger.

Tryk					
Vand-forsyn.	Placering	Mærke	Ibrugtaget	Lognings-interval	Datalogning
NV	8 x brønde	i.o.	i.o.	i.o.	i.o.
VCS	Efter pumpe afgang rentvandstank Dalumværket	Danfoss og PR	2003	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 sek-værdier i mange år
	55 x brønde	Danfoss og PR	1996-2009	1 min (5 sek mellem kl. 2-4)	Registreres i SQL-database, gemmes som 10 min-værdier i min. 14 døgn (ofte flere år)
AV	60 x brønde	Danfoss MBS 33	2000-2009	1 min	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 min-værdier i mange år
KE	Indgang og afgang alle 7 vandværker	Fisher-porter (AAB)	1985-2009	i.o.	Registreres i SRO-system, slettes efter 3 døgn *
EF	19 brønde	PT 100 følere fra Danfos	i.o.	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 sek-værdier i mange år

\* SRO-system planlægges påbegyndt udskiftet i 2009, så data kan gemmes længere.  
i.o.: ikke oplyst

Tabel 6: Flowsensorer i drift i projektets vandforsyninger.

Flow					
Vand-forsyn.	Placering	Mærke	Ibrugtaget	Lognings-interval	Datalogning
NV	Afgang anlæg 1, Sjælsø vandværk	i.o.	i.o.	i.o.	i.o.
	Afgang anlæg 2, Sjælsø vandværk	i.o.	i.o.	i.o.	i.o.
	Afgang mod Gentofte fra Sjælsø vandværk	i.o.	i.o.	i.o.	i.o.
	Afgang mod Gentofte fra Sjælsø vandværk	i.o.	i.o.	i.o.	i.o.
	Indgang Lundtofte pumpestation	i.o.	i.o.	i.o.	i.o.
	Indgang Karlebo vandtårn	i.o.	i.o.	i.o.	i.o.
	Indgang Hørsholm vandtårn	i.o.	i.o.	i.o.	i.o.
	Indgang Hjortekær vandtårn	i.o.	i.o.	i.o.	i.o.
	Indgang Jægersborg vandtårn	i.o.	i.o.	i.o.	i.o.
VCS	8 x brønde	i.o.	i.o.	i.o.	i.o.
	Efter pumpe afgang rentvandstank, Dalumværket	Siemens magnetiske flowmåler	2003	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 sek-værdier i mange år
	Efter pumpe afgang rentvandstank, Lundeværket	Siemens magnetiske flowmåler	2003	1 sek	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 sek-værdier i mange år
AV	55 x brønde	Siemens magnetiske flowmåler	1996-2009	1 min (5 sek mellem kl. 2-4)	Registreres i SQL-database, gemmes som 10 min-værdier i minimum 14 døgn (oftest år)
	60 x brønde	Siemens magnetiske flowmåler	2000-2009	1 min	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 min-værdier i mange år
KE	Indgang og afgang alle 7 vandværker	Danfoss /Siemens magnetiske flowmålere	1985-2009	i.o.	Registreres i SRO-system, slettes efter 3 døgn *
EF	19 x brønde	MAG 3100 /5000 flowmålere	i.o.	5 min	Registreres i SRO-system, gemmes som 5 min-værdier i mange år

\* SRO-system planlægges påbegyndt udskiftet i 2009, så data kan gemmes længere.  
i.o.: ikke oplyst



Tabel 7: Termometre i drift i projektets vandforsyninger.

Temperatur					
Vand-forsyn.	Placering	Mærke	Ibrugtaget	Lognings-interval	Datalogning
NV	8 x brønde	i.o.	i.o.	i.o.	i.o.
VCS	55 x brønde	Danfoss, PR og Vega	1992-2009	1 min (5 sek mellem kl. 2-4)	Registreres i SQL-database, gemmes som 10 min-værdier i min 14 døgn. Døgngennemsnit gemmes i mange år
AV	Afgang Stautrup-værket	i.o.	Marts 2009	15 min	Registreres i SRO-system, gemmes som 15 min-værdier
	60 x brønde	Danfoss MBT 5252	2000-2009	1 min	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 min-værdier
KE	Tipperup bygningsværk (råvandsledning)	WTW Tetracon 700 IQ	Juni 2009	i.o.	Registreres i SRO-system, slettes efter 3 døgn *
EF	Efter iltning Vognsbøl Vandværk	Indbygget i iltensor	i.o.	1 min	Registreres i SRO-system, gemmes som 1 min-værdier i flere år

\* SRO-system planlægges påbegyndt udskiftet i 2009, så data kan gemmes længere.  
i.o.: ikke oplyst

Tabel 8: UV,VIS spektrofotometer i drift hos Københavns Energi A/S.

UV,VIS spektrofotometer					
Vand-forsyn.	Placering	Mærke	Ibrugtaget	Lognings-interval	Datalogning
KE	Ejby bygværk (ledningsnet)	Scan	September 2009	i.o.	Data logges og sendes via GPRS til server PC

i.o.: ikke oplyst

Informationen fra Tabel 1 - Tabel 8 er sammenfattet i Tabel 9, og det kan konkluderes, at hovedfokus for sensorer til monitorering af vandkvalitetsparametre forsat ligger på vandværkerne, dog er der sjældent mere end et eksemplar af hver type sensor på hvert værk. Hyppigheden af de enkelte sensorer på værkerne fordeles på turbiditet: 15 værker, ilt: 4 værker, ledningsevne: 2 værker og pH: 2 værker, hvilket fortsat må betragtes som et relativt beskedent antal. Ude på ledningsnettet er fokus rettet mod sensorer til monitorering af fysiske parameter (flow, tryk og temperatur) til overvågning af ledningsnettets tilstand og drift. I nogle forsyninger er der sensorerne i alle ledningsnettets brønde (fx 55 brønde hos VandCenter Syd A/S), i andre kun i et mindre antal.

Forsyningerne har taget sensorer i brug for at overvåge drift og processer på vandværkerne. Til en start har man først og fremmest ønsket at skabe sig et erfaringsgrundlag: hvordan ser sensormåledata ud? hvad er det man ser på målingerne? og hvad kan man bruge det hele til? Når der er opnået en forståelse af, hvad det er, man kan se ud af målingerne, vil der også komme større klarhed over, hvad man kan bruge dem til og hvordan man skal forholde sig til dem.

Udover sensorerne i tabellerne forventer vandforsyningerne at udvide sensorparken i de kommende år. Århus Vand A/S planlægger at installere turbiditetssensorer ved afgang fra alle forsyningens 10 værker indenfor de næste 3 år. VandCenter Syd A/S afprøver i forbindelse med ombygningen af Holmehaveværket i 2010 en mobil sensortavle (kan flyttes imellem forskellige positioner på værket) med monitoring af turbiditet, ledningsevne, ilt, pH og temperatur til kontrol af processer og effekt af ændringer. Viser denne sig at virke tilfredsstillende, vil sensortavler blive indkøbt til alle forsyningens værker uden fast indbyggede sensorer. Københavns Energi A/S vil i 2010 supplere de eksisterende sensorer til monitoring af turbiditet ved afgang af deres 7 vandværker med sensorer til monitoring af pH, ledningsevne, ilt og temperatur. Esbjerg Forsyning A/S har investeret i turbiditetssensorer til yderligere to vandværker, og på sigt er det planen, at alle 7 vandværker indenfor Esbjerg Forsyning skal have installeret turbiditetssensorer. Der er således tale om en betydelig udbygning af den eksisterende sensorpark indenfor de kommende år, en tendens man må forvente afspejlet i landets øvrige forsyninger.

Tabel 9: Opsummering af hvilke sensorer, der i drift hvor i projektets forsyninger.

Sensor	Antal vandværker (Antal forsyninger)	Antal placeringer på Ledningsnet (Antal forsyninger)
Turbiditet	15 (5)	1 på pumpestationer (1)
Ledningsevne	2 (1)	1 på råvandsledning 1 i brønd (1)
pH	2 (1)	1 i brønd (1)
Ilt	4 (4)	1 i brønd (1)
Tryk	8 (2)	1 8 brønde (1) 1 55 brønde (1) 1 60 brønde (1) 1 19 brønde (1)
Flow	11 (3)	2 på ledningsnet (1) 1 på pumpestation (1) 4 i vandtårne (1) 1 55 brønde (1) 1 60 brønde (1) 1 19 brønde (1)
Temperatur	2 (2)	1 8 brønde(1) 1 55 brønde(1) 1 60 brønde(1) 1 på råvandsledning (1)

## 2.1 Håndtering af sensordata

Vandforsyningerne har i dag i større eller mindre udstrækning deres produktion (indvindinger og vandværker) og forsyningsnet indlagt i SRO-systemer (Styring-Regulering-Overvågning). Disse systemer leveres fra et større antal udbydere og varierer i funktionalitet, brugervenlighed samt

kapacitet, og markedet er i hastig udvikling. I teorien kan en hel forsyning styres centralt fra via SRO-systemet.

Det er som regel en længerevarende proces at få alle elementer i forsyningen (sensorer, pumper, niveaumålere mm.) opkoblet på SRO-systemer, og i dag er der næppe nogle forsyninger, der har alt i forsyningen opkoblet på samme system. I de fleste tilfælde vil man have opkoblet brøndsensorer, samt udvalgte sensorer, pumper, niveaumålere og processer på enkelte værker. Tillige kan der være flere forskellige systemer i den enkelte forsyning, fx hvis forskellige vandværker i en forsyning er blevet opkoblet på SRO-systemer i forskellige perioder eller et nyt system gradvis implementeres. Ved sammenlægning af forsyninger, vil der ligeledes blive benyttet flere forskellige systemer i en længere overgangsperiode. Det kræver således et godt overblik hos medarbejderne at vide, hvordan og hvad der kan trækkes af informationer fra forsyningen.

SRO-systemets brugerflade kan vise de opkoblede elementer og fx løbende vise sensormålinger grafisk og gemme indgående målinger i en database. Hvorledes målingerne gemmes, varierer imellem systemer og imellem forsyninger. Nogle forsyninger gemmer målingerne med den loggede intensitet (alle måledata), mens andre kun gemmer værdier midlet over et længere tidsinterval (fx 1 time). Nogle gemmer deres måledata i mange år, andre kun i få dage eller slet ikke, og således variere potentialet for at anvende historiske måledata.

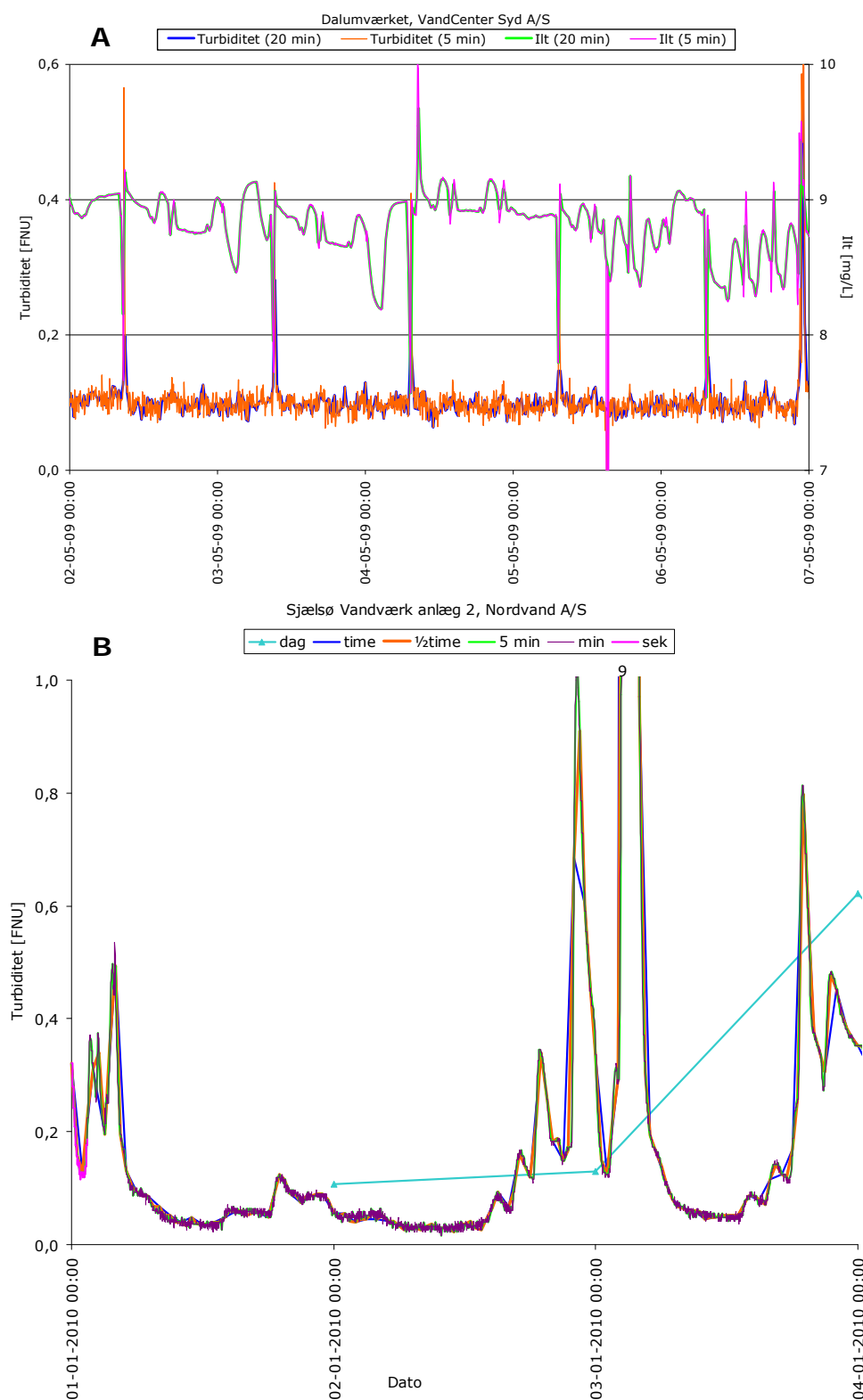
Der er ligeledes stor forskel på, hvordan sensormålinger anvendes i den daglige drift. I nogle tilfælde er SRO-systemet opsat til at give alarm til driftspersonalet, når lokalt fastlagte grænseværdier overskrides, men i de fleste tilfælde ligger 'normal-niveauer' som en erfaring hos personalet, der holder øje med niveauerne, men som ikke har fastlagt en rutine for aktiv brug af sensormålinger. Ofte ligger erfaringen med sensormålinger således udokumenteret hos enkelte medarbejder.

Sensormålinger anvendes fortrinsvis aktivt hos projektets forsyninger i forbindelse med isolerede hændelser fx ved driftsomlægninger, ombygninger eller specifikke undersøgelser af en proces, hvor sensormålinger anvendes til kontrol og evaluering. Sådanne undersøgelser foretages oftest ad hoc af driftspersonalet, så selvom sensormåledata fra undersøgelserne kan trækkes fra databasen, er der ikke altid dokumentation for, hvad der er monitoreret, hvilket reducerer den historiske værdi af måledata. Generelt vil den enkelte vandforsyning ikke have ressourcer til detaljeret at analysere historiske måledata og identificere årsagssammenhænge, og sensormålinger rummer således et fortsat uudnyttet potentiale for driftsmonitoring og -optimering.

SRO-systemerne er ikke altid en optimal platform for detaljeret analyse af sensormåledata, som derfor må overføres til analyse på en anden platform fx Excel eller Acces. Det har dog vist sig, datatilgængeligheden ikke nødvendigvis er ligetil.

SRO-systemerne er oftest sat op med begrænsning på størrelsen af et datatræk, så ved træk af måledata for længere perioder, skal det udføres som mange på hinanden følgende træk, hvilket kan være ret tidskrævende. Hvis der er logget sekund-værdier, så vil en periode på et par måneder blive en u håndterlig stor fx Excelfil, og et u hensigtsmæssigt stort antal træk skulle

bestilles fra driftspersonalet. Da ressourcen ofte ligger hos enkelte medarbejdere, kan dette i sig selv blive en hindring for leveringen af måledata.



Figur 1: Eksempler på betydning af tidsmæssigt format af sensormåledata (Serienavne angiver periode logningsværdier er midlet over – baseret på logning hvert sekund).

A: Data (turbiditet og ilt) fra Dalumværket, VandCenter Syd A/S.

B: Data (turbiditet) fra Sjælsø vandværk, anlæg 2, Nordvand A/S.

Måledata trækkes (og gemmes) derfor oftest som midlede værdier, dvs. en 5 min-værdi er en middelværdi af logning over 5 minutter. Logges der med 1 sekunds interval ligger der 300 logninger til grund for 5 min-værdier, logges der med 1 minuts interval, ligger der 5 logninger til grund for 5 min-værdien osv.

Det er vigtigt at være opmærksom på, at information om ekstremvariationer forsvinder, når der midles over større tidsintervaller. Med måledata for turbiditet og ilt fra Dalumværket, VandCenter Syd A/S og for turbiditet fra Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S som eksempel, er det illustreret, hvorledes information om ekstreme bevares, når der midles over varierende tidsintervaller (Figur 1). Ved at gå fra logningen per sekund til per minut (Figur 1B) mistes kun lidt information om variation, da de fleste udslagsgivende hændelser varer længere end 1 minut. Ved at gå fra 1min-værdier til 5 min-værdier sløres de helt små variationer, som primært er 'støj', mens den tidsmæssige placering af hændelsen samt ekstremværdi ikke ændres væsentligt, da ekstremhændelserne oftest strækker sig over flere minutter. Ved at gå fra 5 min-værdier til 20 eller 30 min-værdier opnås fortsat en rimeligt acceptabel tidsmæssig placering af hændelserne, men der mistes information om ekstremværdiens størrelse (Figur 1A og B). Fra 20-30 min-værdi til time-værdi mistes betydelig information om ekstremværdiernes størrelse, og lavere værdier kan helt udviskes. Der kommer selvfølgelig også større usikkerhed på den tidsmæssige placering af hændelsen. Ved at gå op til døgn-værdier mistes stort set al information om hændelser og ved 'normal drift' uden så store ekstreme på enkelte dage (som illustreret på Figur 1B) vil man ende med kurver stort set uden variation. Det er således vigtigt at have for øje, hvordan og til hvad man ønsker at anvende historiske måledata, når det i forsyningerne besluttet hvilket tidsformat, måledata skal trækkes (og gemmes) i. Når datamængder og analysepræcision skal vægtes, vil 5 min-værdier kunne være et fornuftigt valg.

Til tider skal datatræk foretages lidt bagvendt, da hvilke informationer, der kan trækkes og hvordan, helt afhænger af, hvad der er koblet på SRO-systemet, og hvad der er valgt gemt. Fx kan information om boringskombinationer opnås ved, at der fra SRO-systemet direkte kan trækkes indvindingsvolumener fra den enkelte boring over tid eller som start-stop tidsangivelser for boringspumper, der så kan sorteres ud. Tidspunkter for returskyl vil fx ligeledes kunne trækkes som information om aktivitet af returskyllevandspumper eller som filter inde/ude af drift.

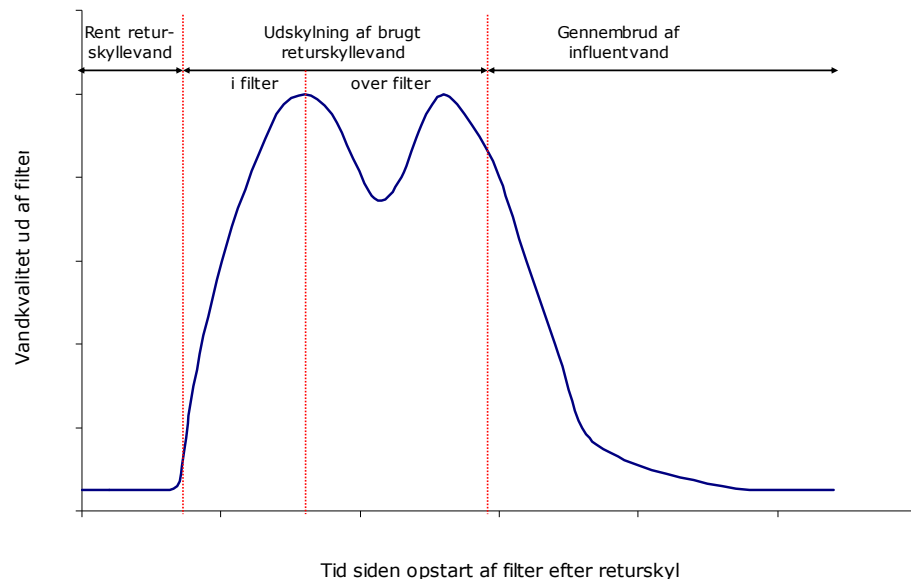
Implementering af sensorer og SRO-systemer er flere steder stadig relativt nyt, og der hersker derfor usikkerhed om, hvad der kan trækkes af information og hvad, der vil være hensigtsmæssigt at trække, da det kræver relativt store ressourcer før den enkelte medarbejder får 100% fortrolighed med, og udbytte af systemerne.

### 3 Sensortidsserier fra vandværker

For at kunne belyse hvad der måles med on-line sensorer, blev tidsserier af sensormåledata fra vandværker analyseret med henblik på at årsagsidentificere variationer. For at kunne knytte en årsag til et signal er det nødvendigt at kende til vandværkets processer og drift, og der er således knyttet en kort beskrivelse af de pågældende vandværker til tidsserierne. I det følgende analyseres først sensordataserier fra 5 anlæg, hvorefter der følger en fælles diskussion. På vandværkerne monitoreres vandkvalitetsparameter (turbiditet, ilt, pH og ledningsevne) hvor turbiditetsmålere er de sensorer, der er benyttet på flest vandværker.

Under returskyl af et filter vendes strømningsretningen, så vandet løber nedefra og op. Ved opstart af filtret efter returskyl vendes strømmen igen, så det vand, der kom sidst ind i filtret under returskyllet, vil være det første til at blive skyllet ud af filtret ved opstart. Ved opstart af et filter efter returskyl vil den resulterende vandkvalitet derfor være påvirket af fire vandfraktioner:

- Rent returskyllevand stående under filtret ved returskyllets afslutning
- Brugt returskyllevand, der står i filtret ved endt returskyl
- Brugt returskyllevand, der står over filtret ved endt returskyl
- Influentvand, der ledes på filtret ved opstart efter returskyl



Figur 2: Skitse af hvilke vandfraktioner den resulterende vandkvalitet ved opstart af filter efter returskyl er påvirket af (efter Amirtharajah og Wetstein, 1980).

Den resulterende vandkvalitet (fx mht. turbiditet) efter opstart af et filter efter returskyl vil således kunne beskrives ved en dobbelttop-profil, skitseret på Figur 2. Afhængig af filterporøsitet og filterhastighed vil de to toppe kunne være sammenfaldende. Returskylles med luft eller en blanding af vand og luft, vil de fire vandfraktioner ligeledes blive afspejlet i iltindholdet. Profilen vil endvidere være påvirket af, hvordan filtret opstartes efter returskyl, hvor der generelt skelnes imellem:

- direkte opstart
- reduceret opstart, det vil sige, at der startes op med et lavt flow, der langsomt øges
- opstart efter en vis liggetid

Direkte opstart vil teoretisk give den største påvirkning af den resulterende vandkvalitet, mens opstart efter en vis liggetid vil give den mindste påvirkning.

Hvilken type opstart, der anvendes på det enkelte vandværk, er som regel en kombination af tradition og tekniske muligheder. Perioden, indtil effektiviteten af et filter svarer til effektiviteten før returskyl, betegnes modningstiden, hvilken kan variere meget fra anlæg til anlæg.

Drikkevandsbekendtgørelsens (BEK, 2007) kvalitetskrav ved afgang vandværk for de fire vandkvalitetsparametre er:

- Turbiditet: 0,3 FTU<sup>2</sup> (FNU og NTU tilsvarende enheder)
- Ilt: Så højt, at minimum 5 mg/L overholdes ved indgang ejendom
- Ledningsevne: Minimum 30 mS/m
- pH: 7-8,5

### 3.1 Vognsbøl Vandværk, Esbjerg Forsyning A/S

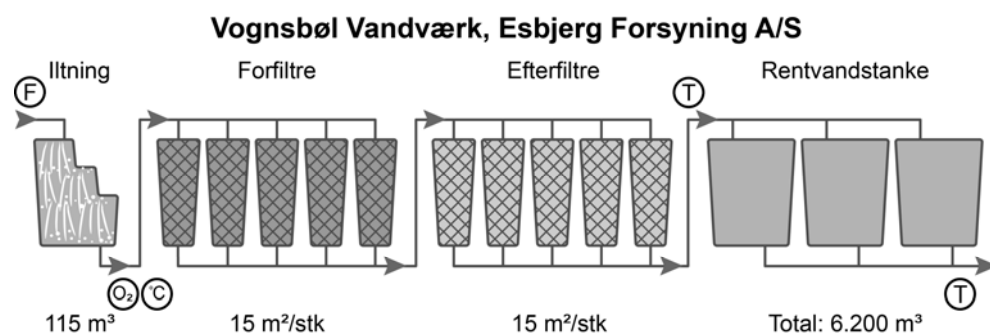
Vognsbøl Vandværk producerer ca. 1,3 mio m<sup>3</sup>/år (i snit ca. 3.600 m<sup>3</sup>/døgn). Værket modtager vand fra 9 borerer på Sekær Kildefelt og 6 borerer fra Bøgeskov kildefelt, alle med en fast ydelse i drift på 45 m<sup>3</sup>/h. Vand fra kildefelterne ledes gennem 32 km ledning til fordelerbygning ved Spangsberg Vandværk, hvor vandet fordeles imellem Spangsberg Vandværk og Vognsbøl vandværk med ca. 40% i snit til Vognsbøl Vandværk. De to værker leverer ca. 70% af vandet i Esbjerg Forsyning. Indvindingen styres via SRO-system ud fra forbruget, hvor borerer aktiveres efter en middelværdi af niveauet i rentvandstankene på Vognsbøl Vandværk og Spangsberg Vandværk. Ved fordelerbygningen fordeles råvandet procentvis til de to værker efter niveauet i rentvandstankene. Indvindingsvariationen over døgnet ligger relativ fast over tid, men pga. blandingen i fordelerbygningen kan de enkelte borerer ikke 'spores' i det indkommende vand på vandværket, men der er generelt lille variation i hvilke borerer, der er kører fra dag til dag.

Vandbehandlingen på værket består af iltning (risletårn), filtrering i 5 parallelle forfiltre (kvarts, hver 15 m<sup>2</sup>) efterfulgt af 5 parallelle efterfiltre (kvarts, hver 15 m<sup>2</sup>), hvorefter vandet ledes til 3 rentvandstanke med et totalvolumen på 6.200 m<sup>3</sup> (Figur 3). Både forfiltre og efterfiltre returskylles på samme tidspunkt (et filter ad gangen, først forfiltrene i serie og derefter efterfiltrene i serie), når 14.000 m<sup>3</sup> vand har passeret (i snit hver 3-4 dag), dog skal der skal gå mindst 2 døgn og højst 7 døgn imellem returskyl. Hvert filter returskylles over en 12 min periode (2 min sænkning, 5 min luft, 5 min vand), hvorefter filtret startes direkte op.

Siden juni 2009 har der været installeret turbiditetsensorer efter efterfiltrene og ved afgang værk (efter rentvandstankene), flowmålere på indvindingen ved indgang værk samt iltensor og temperatursensor efter iltningen til kontrol af iltningsprocessen (Figur 3). Da sensorerne således kun havde været i brug i kort tid i oktober 2009, var der endnu ikke fastlagt alarmgrænser for

<sup>2</sup> såfremt det kan dokumenteres, at kvalitetskravet ved indgang til ejendom er overholdt, kan der tillades højere værdi ved afgang fra vandværk dog maksimalt værdien ved indgang til ejendom (1 FTU).

sensormåledata, ligesom der ikke var fastlagt rutiner for brugen af sensormåledata.



Figur 3: Skitse af vandbehandlingen på Vognsbøl Vandværk, Esbjerg Forsyning A/S med angivelse af sensorplacering. F: Flow; T: Turbiditet; O<sub>2</sub>: Ilt; °C: Temperatur.

Sensormålinger for Vognsbøl Vandværk er sammenholdt med driftsdata for uge 42-44 2009 baseret på 5 min-værdier (Figur 7 - Figur 9).

#### Indvindingsflow

Indvindingen fulgte et relativt stabilt døgnmønster med lav indvinding (0-50 m<sup>3</sup>/h) over 2-4 timer i de tidlige morgentimer og høj indvinding resten af døgnet, med højeste indvinding (200-250 m<sup>3</sup>/h) i eftermiddags- og aftentimerne.

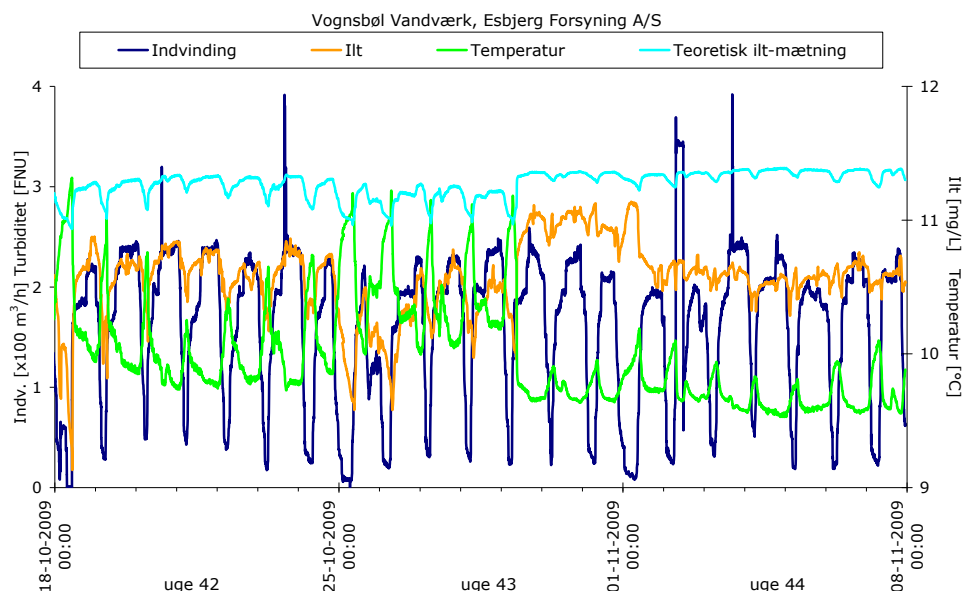
#### Ilt

Temperatur- og iltensorer var installeret direkte efter risletårnet til at kontrollere iltningseffektiviteten. Temperaturen efter iltningstrinet varierede over døgnet med indvindingen, så i forbindelse med et lavt flow og dermed længere opholdstid i risletårnet steg temperaturen med op til 1°C.

Over uge 42-44 2009 var spændet i temperatur 9,5-11,5°C. Under antagelse af 100% iltmætning ville temperatureffekten maksimalt kunne have resulteret i en variation i iltkoncentration på 0,5 mg/L, men den reelle variation var på 2,0 mg/L (9,1-11,1 mg/L) (Figur 4).

Sammenlignes den målte iltkoncentration med iltmætningskoncentrationen ved den målte temperatur (Figur 4), er det tydeligt, at iltningseffektiviteten varierede over tid, da de to kurveforløb ikke fulgtes ad. Havde iltningseffektiviteten udgjort en fast procentdel (fx 90%), ville kurven for den målte iltkoncentration blot have været parallelforskydt i forhold til kurven for iltmætningskoncentrationen. Iltningseffektiviteten varierede imellem 86 og 94%, over perioden, hvor iltningseffektiviteten var lavest ved lavt flow i første halvdel af perioden. Luftningsenheden var stadig under indkøring i perioden og blev flere gange driftsjusteret, hvilket kan forklare skiftet til mere stabil iltningseffektivitet i løbet af uge 43 (Figur 4).

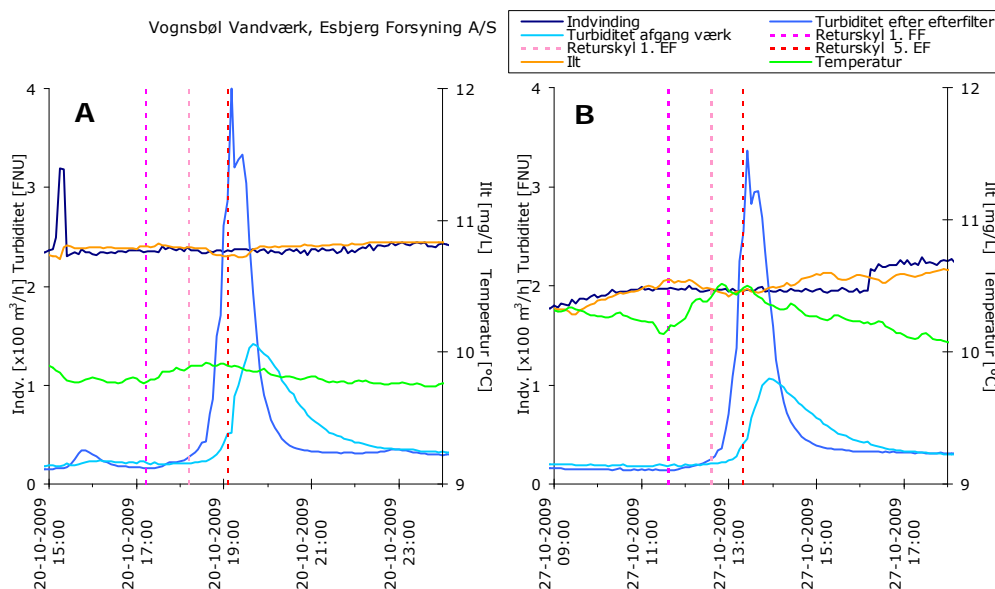




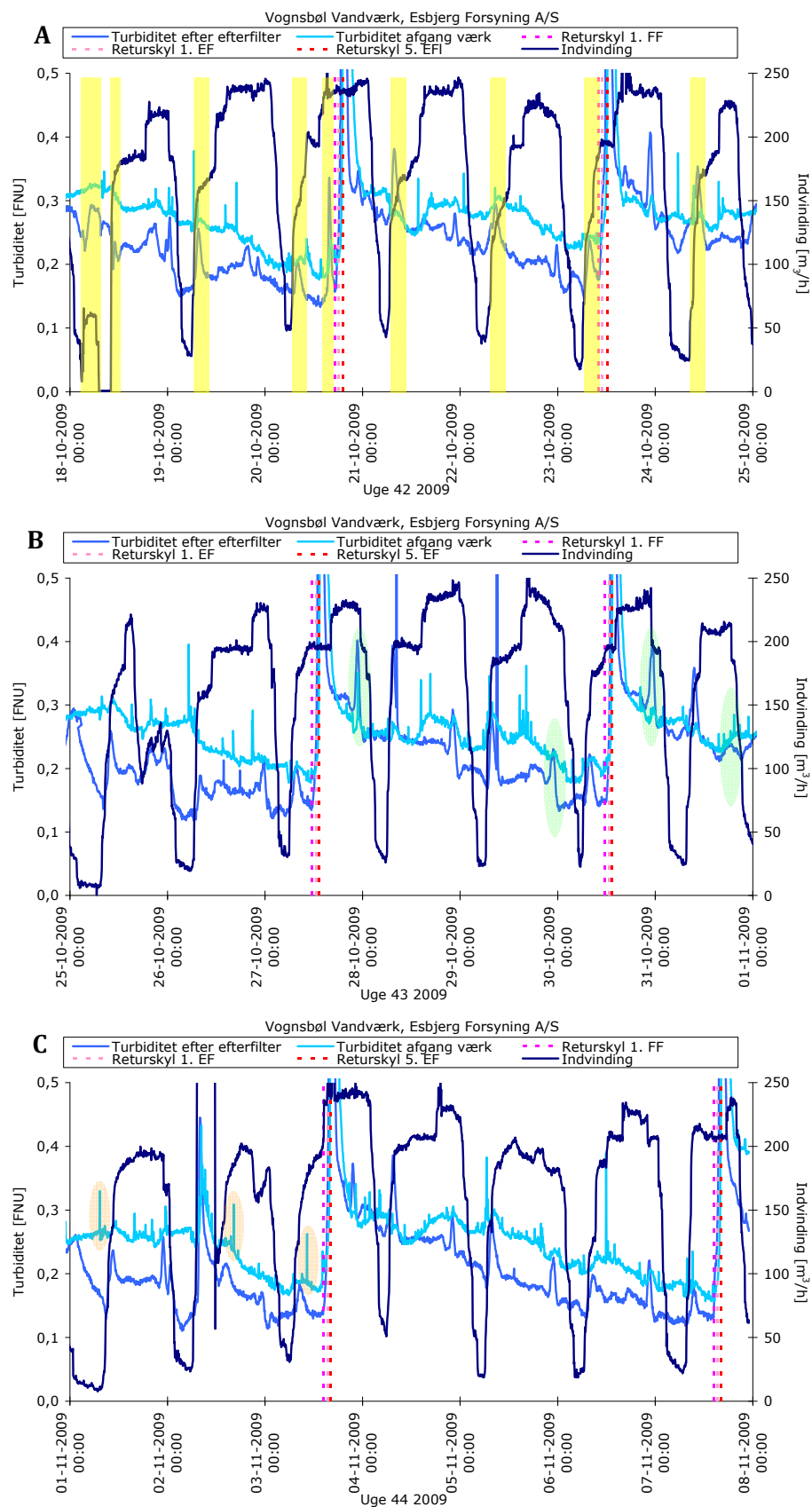
Figur 4: Teoretisk iltmætning ved målte temperatur sammenlignet med målte iltkoncentration, 5 min-værdier for Vognsbøl Vandværk, Esbjerg Forsyning A/S. Iltmætning fastlagt ud fra:  $C [\text{mg O}_2/\text{L}] = -0,255 [1/^\circ\text{C}] \times T [^\circ\text{C}] + 13,820 [\text{mg O}_2/\text{L}]$  under antagelse af linearitet over intervallet 9-12°C. Opdelt på uger i Figur 7-Figur 9.

### Turbiditet

Opstart af forfiltre efter returskyl gav stort set ikke anledning til ændringer i turbiditeten målt efter efterfiltrene, mens opstart efter returskyl af efterfiltrene gav kraftige kortvarige stigninger i turbiditeten målt efter efterfiltrene til niveauer på 3,1-4,8 FNU (eksempler forstørret i Figur 5). Turbiditeten faldt til 0,3 FNU i løbet af 6-8 timer og aftog yderligere til 0,15 FNU forud for næste returskyl (turbiditetsniveauer fra Figur 7-Figur 9 forstørret i Figur 6).



Figur 5: Eksempler på turbiditetstoppe efter opstart af filtre efter returskyl (udsnit af Figur 7 og Figur 8) som 5 min-værdier, Vognsbøl Vandværk, Esbjerg Forsyning A/S. Returskyl angiver tidspunkt for opstart efter returskyl; 1. FF: 1. forfilter; 1. EF: første efterfilter; 5. EF: 5. efterfilter. Øvrige fire forfiltre skylles i serie efter 1. forfilter, og de tre øvrige efterfiltre returskylles imellem 1. og 5. efterfilter (ikke markeret på figur).

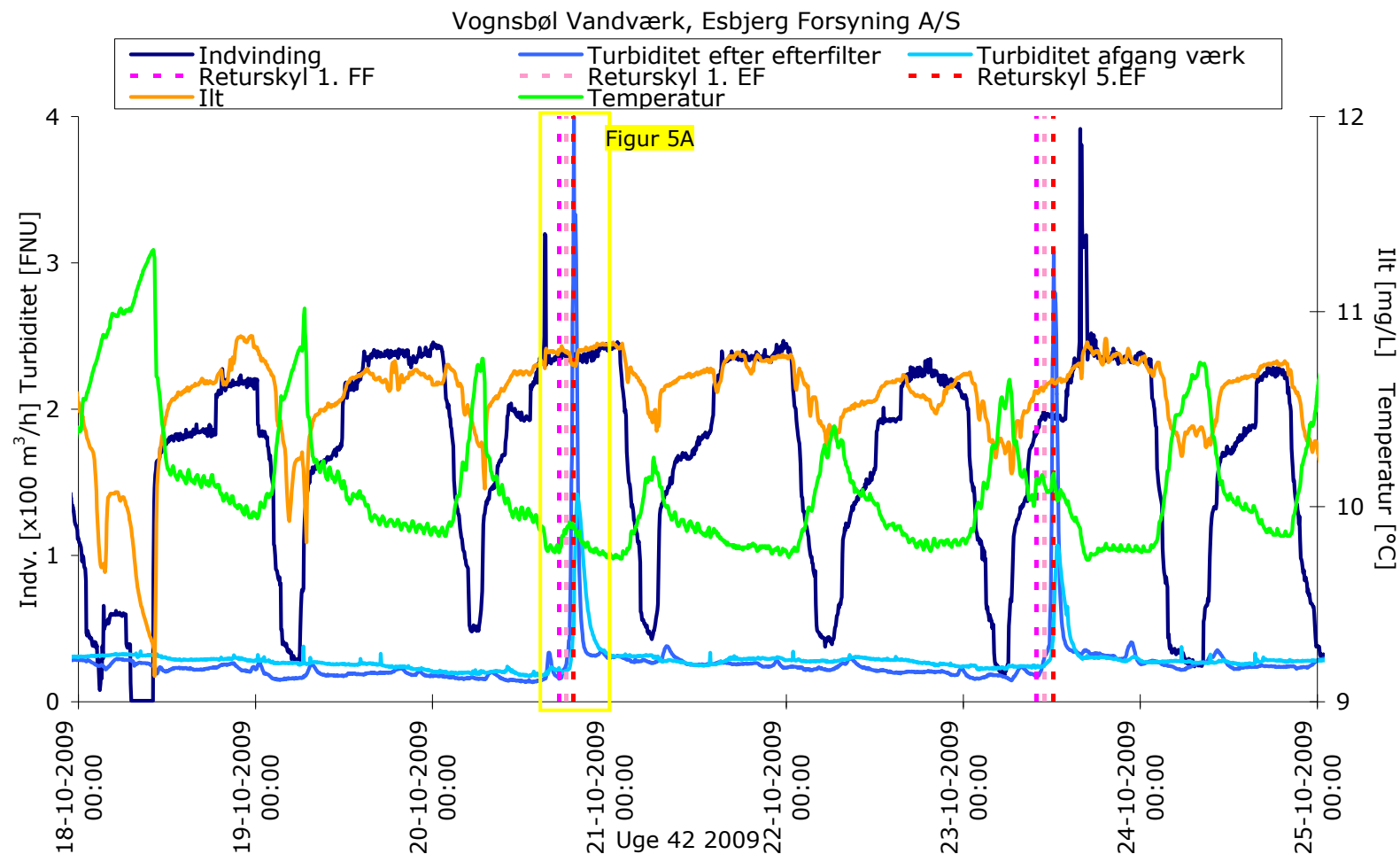


Figur 6: Turbiditetsmålinger som 5 min-værdier, Vognsbøl Vandværk, Esbjerg Forsyning A/S (A-C forstørrelse af Figur 7 - Figur 9). Returskyl angiver tidspunkt for opstart efter returskyl; 1. FF: 1. forfilter; 1. EF: første efterfilter; 5. EF: 5. efterfilter. Øvrige fire forfilter skylles i serie efter 1. forfilter, og de tre øvrige efterfiltre returskylles imellem 1. og 5. efterfilter (ikke markeret på figur). Se tekst for gule, grønne og orange fremhævnninger.

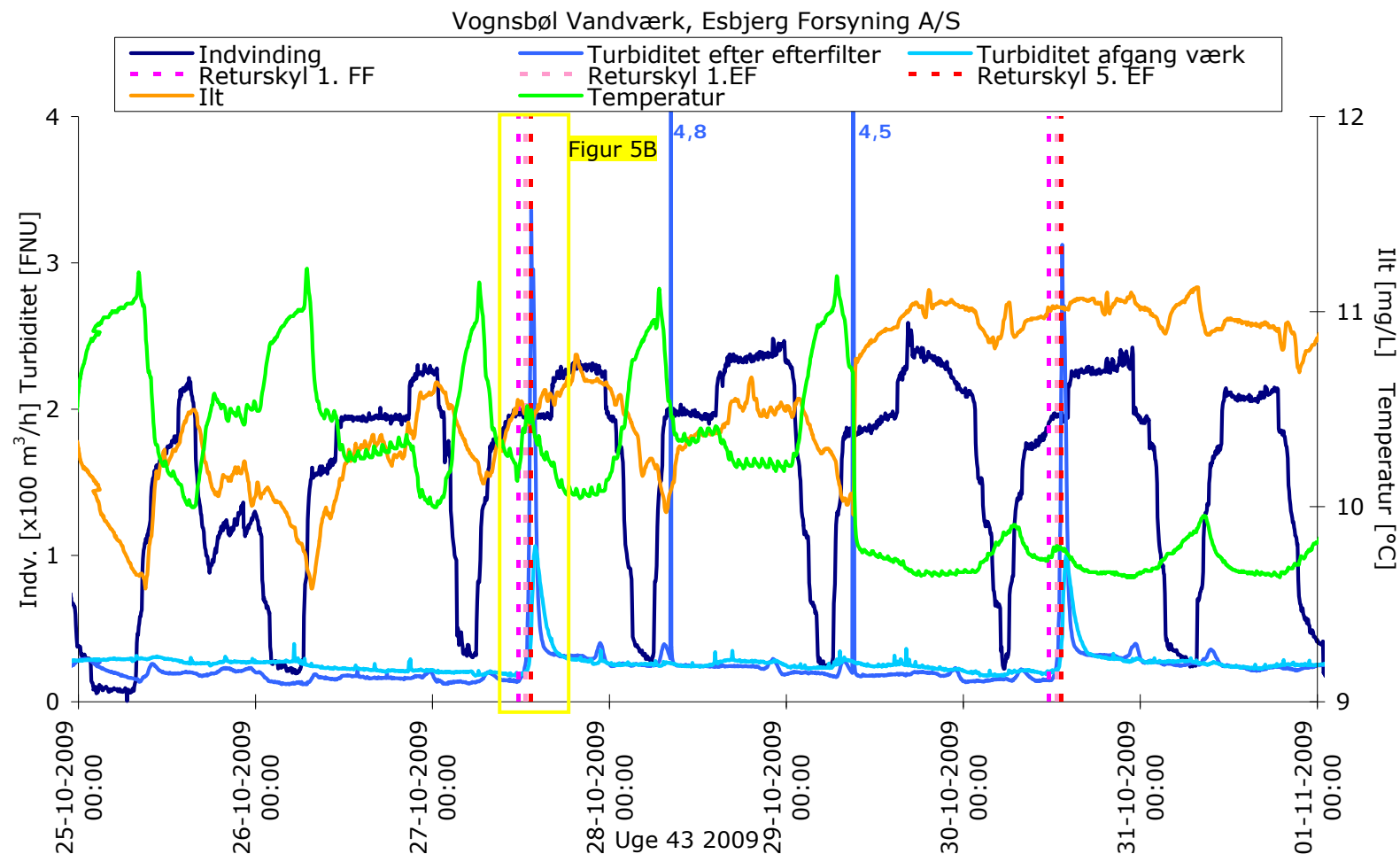
Imellem returskylle var der mindre toppe i turbiditeten (0,06-0,1 FNU over udgangsniveauet), der varede 2-3 timer. Disse toppe forekom i forbindelse med øgning af indvindingsflowet og dermed øget belastning af filtrene (eksempler markeret med gult i Figur 6A). Der var dog også toppe af tilsvarende størrelsesorden på tidspunkter uden flowændringer eller anden umiddelbar forklaring, hvilke må betegnes som 'støj' (eksempler markeret med grønt i Figur 6B). Yderligere gennemgang af sensoren og værkets drift vil være tilrådeligt for at få klarlagt årsagen til disse toppe. Den mest betydende faktor for turbiditetsniveauet på et givent tidspunkt var tiden siden sidste returskyl. Turbiditetstoppe fra opstart efter returskyl kunne genfindes efter rentvandstanken, som turbiditetstoppe af størrelsesorden 1,0-1,4 FNU. Opblanding i rentvandstanken udjævnede toppene i turbiditeten målt efter efterfiltrene, så toppene var lavere, mens det generelle niveau efter rentvandstankene var højere.

D. 28/2 og d. 29/2 var der kortvarige (1-2 logninger som 5 min-værdier) kraftige udslag i turbiditeten (4,5 og 4,8 FNU) (Figur 8). Disse udslag var sandsynligvis fejludslag på turbiditetsensoren fx pga. af luft, eller fejl i dataoverførelsen, da forløbet af turbiditetskurven ikke ændres i øvrigt og udslaget ikke genfindes i turbiditeten målt efter rentvandstanken. Fra turbiditetsmåleren efter rentvandstankene blev der ligeledes set nogle kortvarige (1 logninger som 5 min-værdier) udslag (størrelsesorden 0,1 FNU), der formentlig også skal ses som fejludslag (eksempler markeret med orange i Figur 6C), da de forudgående kurveforløb fortsatte efterfølgende.

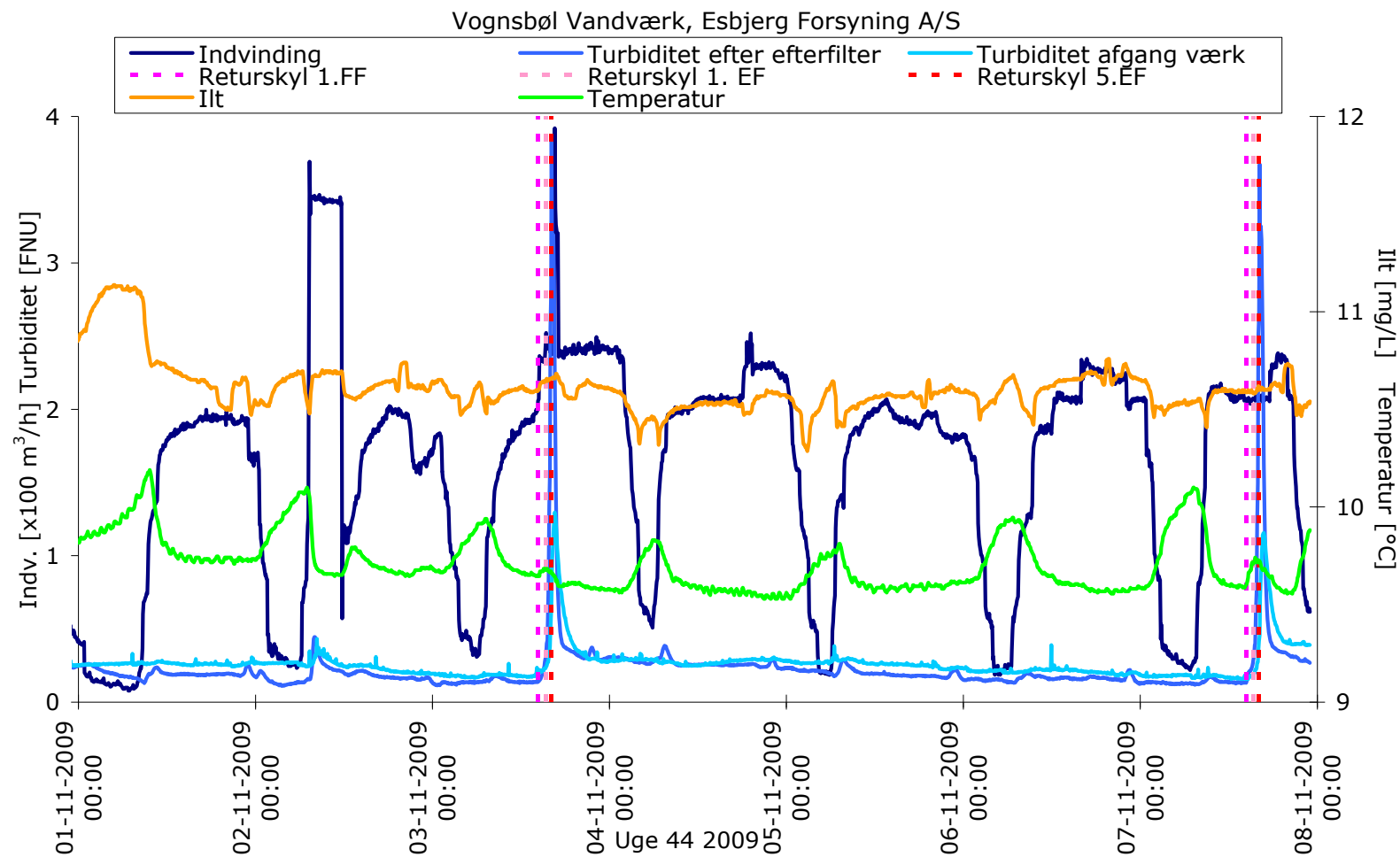
Grundet turbiditetstoppe ved opstart efter returskyl af de fem efterfiltre i serie, blev kvalitetsværdien på 0,3 FNU overskredet ved afgang vandværk i ca. 8 timer efter hvert sæt returskyl. Kraftig øgning af flowet ledte ligeledes til lejlighedsvis overskridelser af kvalitetsværdien. Overskridelser af kvalitetsværdien vil formentlig kunne begrænses, hvis indvindingen var mere jævn, og hvis alle efterfiltre ikke blev returskyllet på samme tidspunkt.



Figur 7: Sensormålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Vognsbøl Vandværk, Esbjerg Forsyning A/S for uge 42 2009. Returskyl angiver tidspunkt for opstart efter returskyl ; 1. FF: 1. forfilter; 1. EF: første efterfilter; 5. EF: 5. efterfilter. Øvrige fire forfiltre skylles i serie efter 1. forfilter, og de tre øvrige efterfiltre returskylles imellem 1. og 5. efterfilter (ikke markeret på figur). Sensorer for ilt og temperatur installeret efter iltningsenheden (før forfiltre).



Figur 8: Sensormålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Vognsbøl Vandværk, Esbjerg Forsyning A/S for uge 43 2009. Returskyl angiver tidspunkt for opstart efter returskyl; 1. FF: 1. forfilter; 1. EF: første efterfilter; 5. EF: 5. efterfilter. Øvrige fire forfiltre skylles i serie efter 1. forfilter, og de tre øvrige efterfiltre returskylles imellem 1. og 5. efterfilter (ikke markeret på figur). Sensorer for ilt og temperatur installeret efter iltningssenheden (før forfiltre).

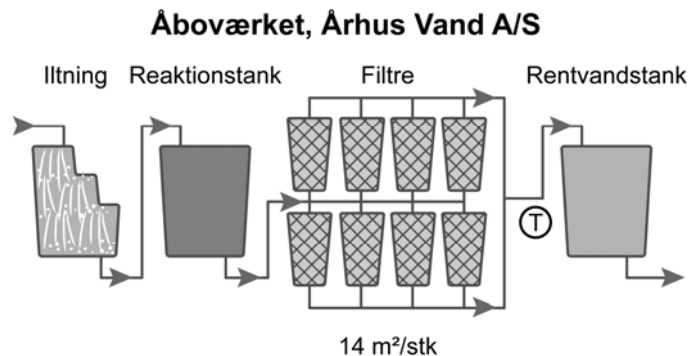


Figur 9: Sensormålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Vognsbøl Vandværk, Esbjerg Forsyning A/S for uge 43 2009. Returskyl angiver tidspunkt for opstart efter returskyl ; 1. FF: 1. forfilter; 1. EF: første efterfilter; 5. EF: 5. efterfilter. Øvrige fire forfiltre skylles i serie efter 1. forfilter, og de tre øvrige efterfiltre returskylles imellem 1. og 5. efterfilter (ikke markeret på figur). Sensorer for ilt og temperatur installeret efter iltningssenheden (før forfiltre).

### 3.2 Åboværket, Århus Vand A/S

Åboværket leverer ca. 10% af forbruget i Århus med en produktion på ca. 1,5 mio m<sup>3</sup>/år (ca. 4.100 m<sup>3</sup>/døgn). Værket modtager vand fra to kildepladser Harlev og Åbo med henholdsvis 5 og 6 indvindingsboringer, hvor Harlev borerne har et højere jernindhold (1,2-2,3 mg/L) end Åbo-boringerne (<1 mg/L). Boringerne leverer en fast ydelse i drift (Å2: 41 m<sup>3</sup>/h, Å3: 39 m<sup>3</sup>/h, Å5: 60 m<sup>3</sup>/h, Å6: 59 m<sup>3</sup>/h, Å7: 38 m<sup>3</sup>/h, Å8: 46 m<sup>3</sup>/h, Ha1: 52 m<sup>3</sup>/h, Ha2: 48 m<sup>3</sup>/h, Ha3: 57 m<sup>3</sup>/h, Ha5: 43 m<sup>3</sup>/h, Ha6: 20 m<sup>3</sup>/h), og der tilstræbes en stabil produktion, der justeres automatisk efter forbruget via SRO-systemet.

Vandbehandlingen består af en iltningstrappe med efterfølgende reaktionstank, 8 parallelle filtre (hver 14 m<sup>2</sup>), hvor vandet fordeles fra den ene ende af to rækker filtre (2 x fire filtre), så fordelingen af produktionen på de 8 filtre afhænger af det aktuelle flow (Figur 10). Herfra føres vandet til rentvandstank på 850 m<sup>3</sup>. Filtrene returskylles hver 5. dag 4 filtre ad gangen. Hvert returskyl tager 19 minutter og udføres i serie på de fire filtre med direkte opstart af det enkelte filter; filter 1-4 returskylles ene dag, hvorefter filter 5-9 returskylles den følgende dag.

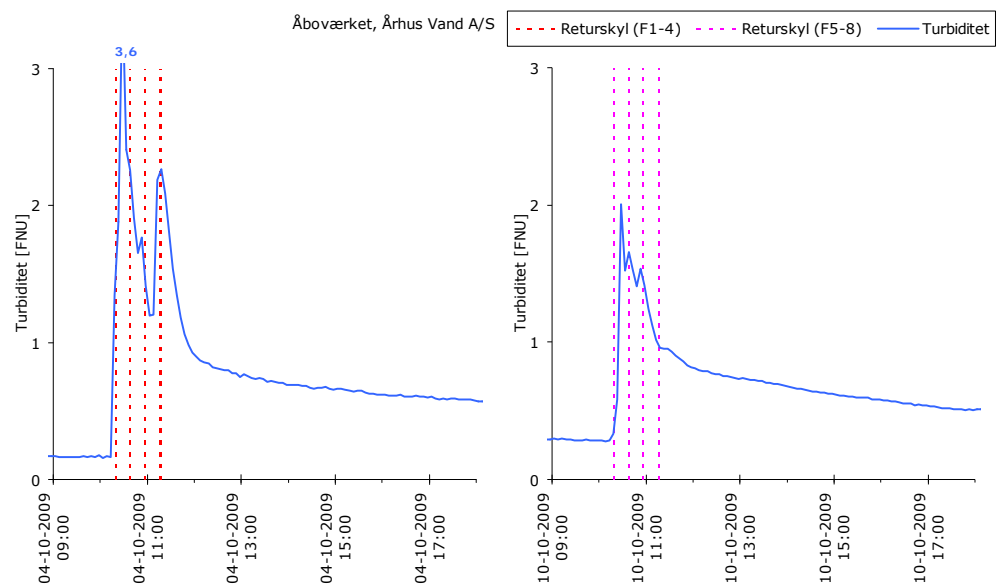


Figur 10: Skitse af vandbehandlingen på Åboværket, Århus Vand A/S med angivelse af sensorplacering. T: Turbiditet.

I februar 2009 blev en mobil turbiditetssensor taget i brug på Åboværket i forbindelse med undersøgelse af filterdriften. Turbiditetssensoren blev flyttet rundt imellem de enkelte filterafgange samt den fælles filterafgang. Data logges hvert 5. min og opsamles lokalt. Måledata for turbiditetssensoren ved den fælles filterafgang er sammenholdt med driftsdata for oktober måned 2009 baseret på 5 min-værdier (Figur 12- Figur 14).

#### Turbiditet

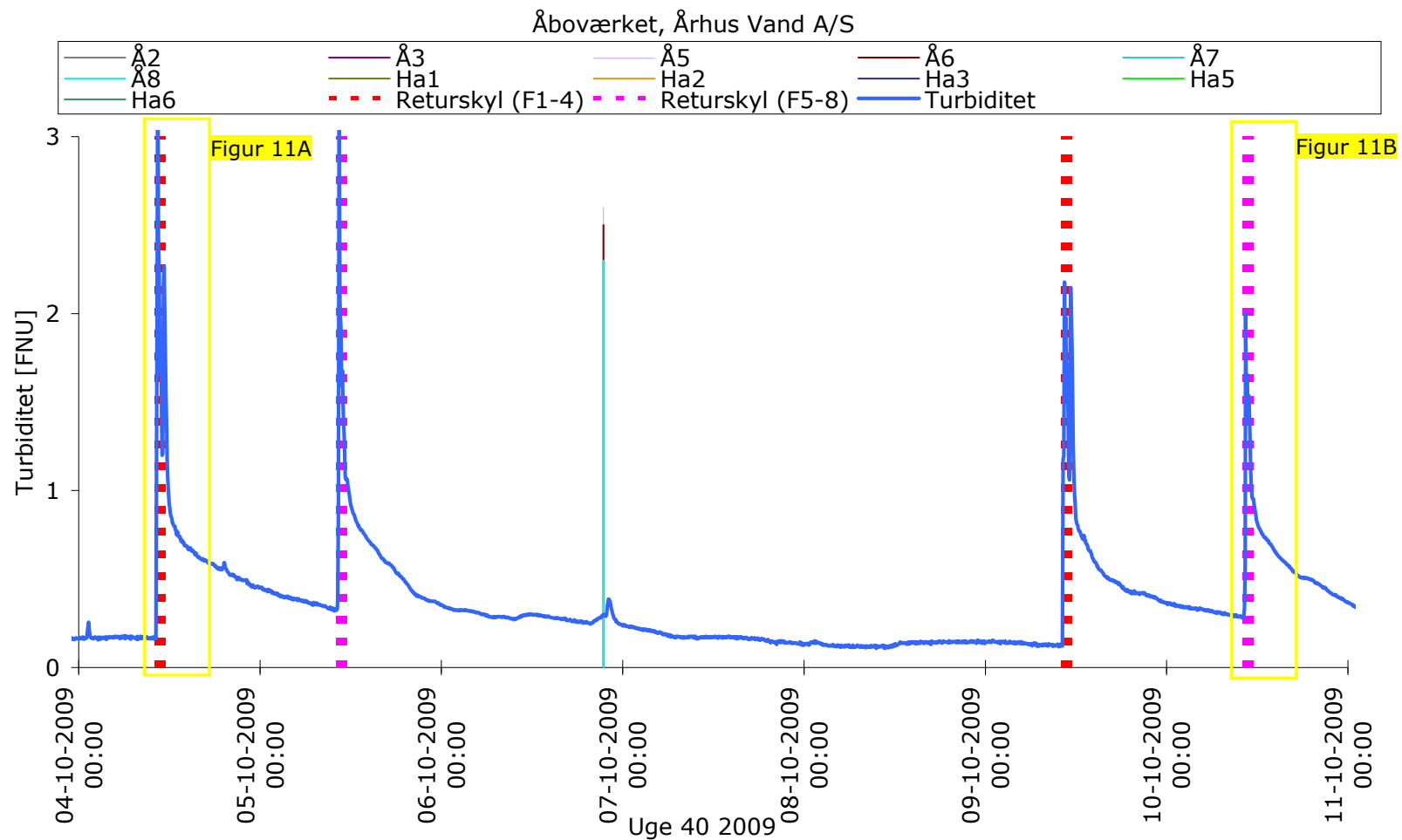
Opstart efter returskyl af filtre gav kraftige stigninger i turbiditeten til maksimumniveauer på 1,6-3,6 FNU (eksempler i Figur 11). De høje niveauer faldt i løbet af 2 timer til 0,5-0,9 FNU, og aftog jævnt over et døgn til 0,2-0,4 FNU og yderligere til 0,1-0,2 FNU fire døgn efter returskyl af filtre 5-9. Imellem returskylle kunne øget flow ved opstart af boring(er) - og dermed øget belastning af filtrene - ligeledes give anledning til 2-3 timers toppe i turbiditeten på 0,04-0,65 FNU over udgangsniveau. Øget flow resulterede i højere toppe i turbiditeten jo kortere tid efter et returskyl flowændringen forekom. Effekten af opstart af en enkelt boring (i modsætning til opstart af 3-4 borer samtidig) afhang af hvor mange borer, der i forvejen var i drift (ikke angivet på figur), og medførte således ikke nødvendigvis en påvirkning af turbiditeten.



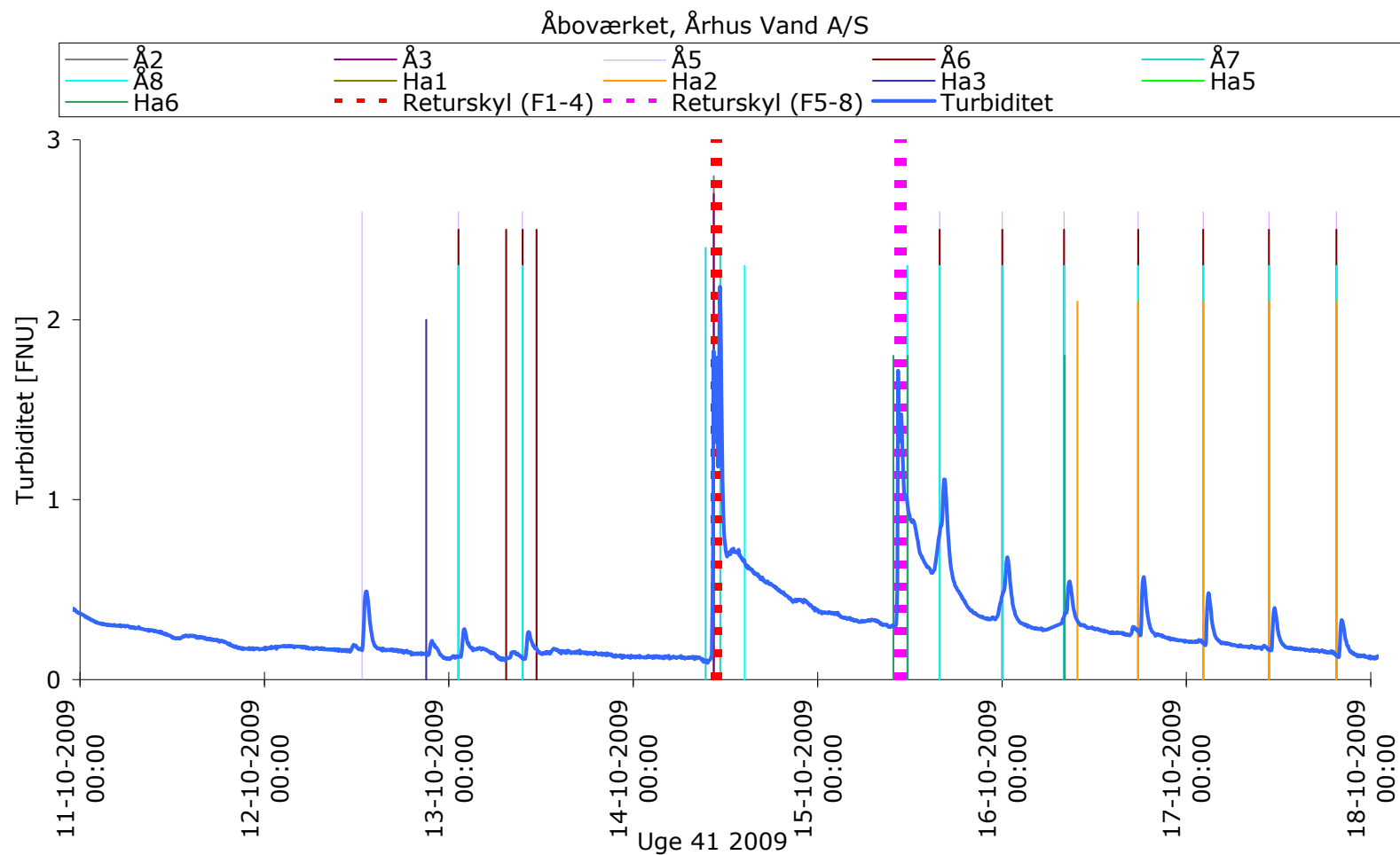
Figur 11: Eksempler på turbiditetstoppe efter opstart af filtre efter returskyl (udsnit af Figur 12) som 5-min værider, Åboværket, Århus Vand A/S. 'Returskyl' angiver tidspunkt for opstart af filter efter returskyl. Turbiditetssensor placeret ved fælles filterafgang.

De langvarige toppe i forbindelse med opstart efter returskyl betød, at kvalitetsværdien på 0,3 FNU blev kraftigt overskredet minimum 2/5 dele af tiden over hver fem-døgns periode.

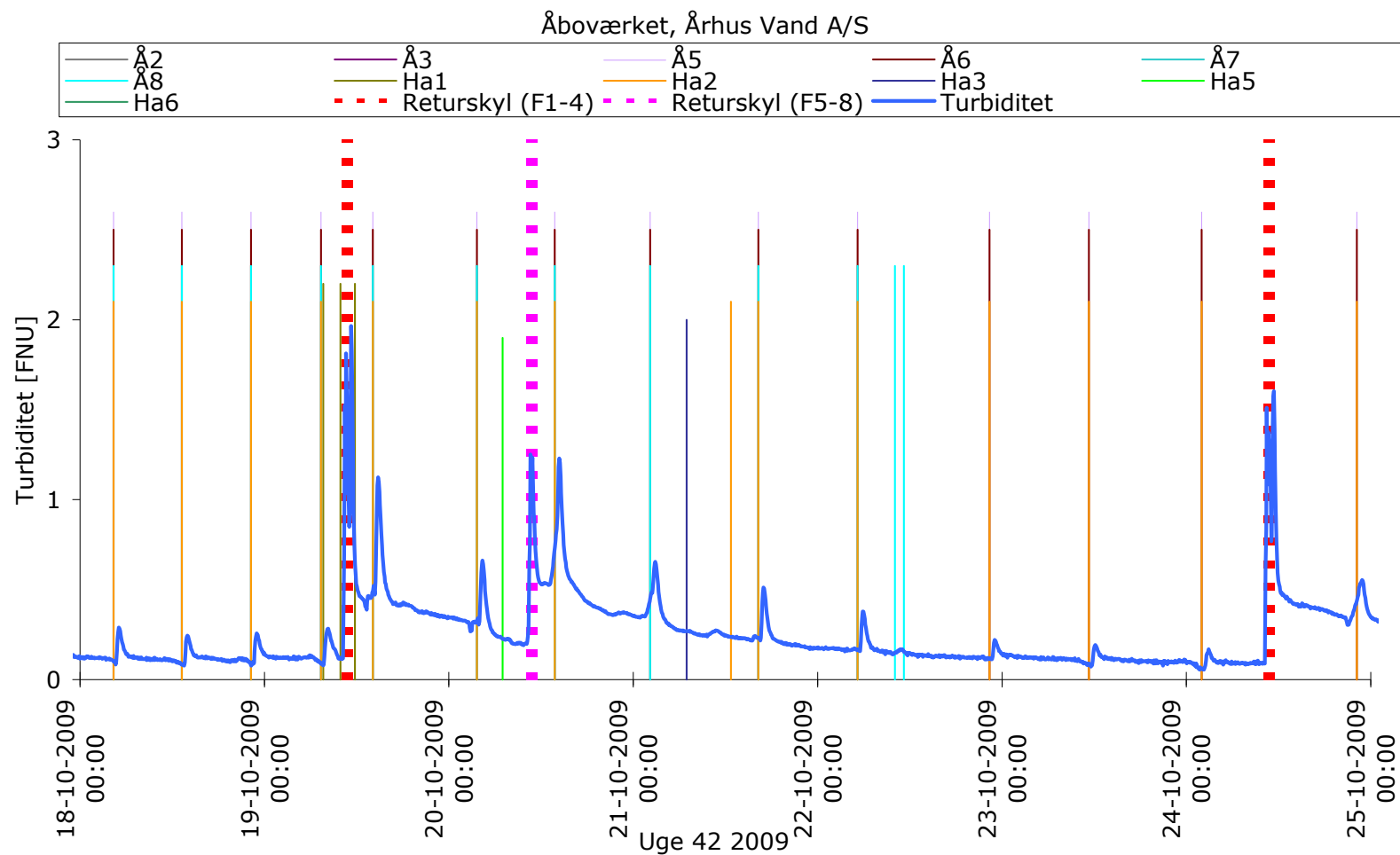




Figur 12: Sensormålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Åboværket, Århus VAnd A/S for uge 40 2009. Turbiditetssensor placeret ved fælles filterafgang. 'Returskyl (#-#)' angiver tidspunkt for opstart af filtre efter returskyl af filtre nr. #-#. Å# og Ha# angiver tidspunkt for opstart af pågældende boring.



Figur 13: Sensormålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Åboværket, Århus Vand A/S for uge 41 2009. Turbiditetssensor placeret ved fælles filterafgang. 'Returskyl (#-#)' angiver tidspunkt for opstart af filtre efter returskyl af filtre nr. #-#. Å# og Ha# angiver tidspunkt for opstart af pågældende boring.



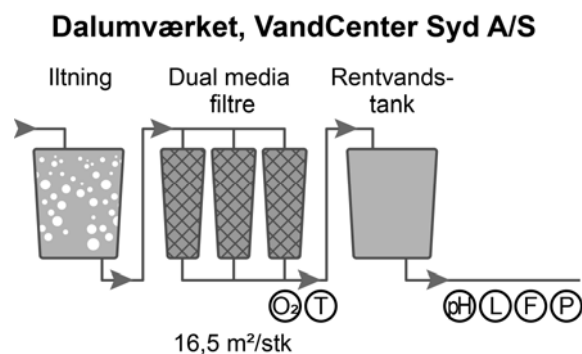
Figur 14: Sensormålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Åboværket, Århus VAnd A/S for uge 42 2009. Turbiditetssensor placeret ved fælles filterafgang. 'Returskyl (##)'

### 3.3 Dalumværket, VandCenter Syd A/S

Dalumværket producerer 0,6 mio m<sup>3</sup>/år (ca. 1.650 m<sup>3</sup>/døgn) baseret på 5 indvindingsboringer med fast ydelse (D4: 18 m<sup>3</sup>/h, D5: 82 m<sup>3</sup>/h, D231: 55 m<sup>3</sup>/h, D245: 54 m<sup>3</sup>/h, D338: 60 m<sup>3</sup>/h) med sammenlignelig vandkvalitet (fx jern: 0,19-1,1 mg/L, mangan: 0,03-0,35 mg/L og NVOC: 0,9-1,4 mg/L). Der tilstræbes en stabil produktion, der justeres via SRO-systemet efter det aktuelle forbrug, og produktionen lukkes således ned 4-8 timer om natten.

Behandlingen på Dalumværket består af et iltningstrin med bundbeluftere, hvorefter vandet fordeles ligeligt på tre parallelle dual-media filtre (kvarts nederst, antracit øverst, hver 16,5 m<sup>2</sup>) og derfra til fælles rentvandstank (Figur 15). Filtre returskylles om natten (indenfor tidsrummet kl. 22-04) efter at 5.000 m<sup>3</sup> har passeret det enkelte filter. Det enkelte filter returskylles over en 33 minutters periode (5 min sænkning, 4 min luft, 5 min vand+luft, 5 min sænkning, 4 min luft, 5 min vand+luft, 5 min vand), hvorefter det startes reduceret op over 15 min. Ca. en gang om måneden foretages i dagtimerne på et eller flere filtre manuel kontrol af returskylsfunktionen, der ved sådan lejligheder kan afvige fra den normale procedure. Disse kontroller foretages i reglen før de 5000 m<sup>3</sup> har passeret det enkelte filter, men volumen-tælleren nul-stilles i forbindelse med kontrol.

Siden 2003 har der på den fælles filterafgang være installeret sensorer til at monitere turbiditet og ilt samt efter rentvandspumpen (afgang værk) sensorer til at monitere pH, temperatur, ledningsevne, flow og tryk (Figur 15). Ud fra erfaringsmæssige værdier er der fastlagt alarmgrænser for turbiditet (maksimum 2 FNU), pH (minimum 7) og ilt (minimum 5 mg/L), hvor der i tilfælde af overskridelser sendes alarm til driftspersonalet via SRO-systemet. Ligeledes anvendes data historisk til undersøgelse af langtidseffekter af driftsændringer og til kontrol, hvor det fx undersøges, om en kontrolprøve med forhøjet turbiditet, blev udtaget samtidigt med et returskyl.



Figur 15: Skitse af vandbehandlingen på Dalumværket, VandCenter Syd A/S med angivelse af sensorplacering. O2: Ilt; T: Turbiditet; pH: pH; L: Ledningsevne, F: Flow, P: Tryk.

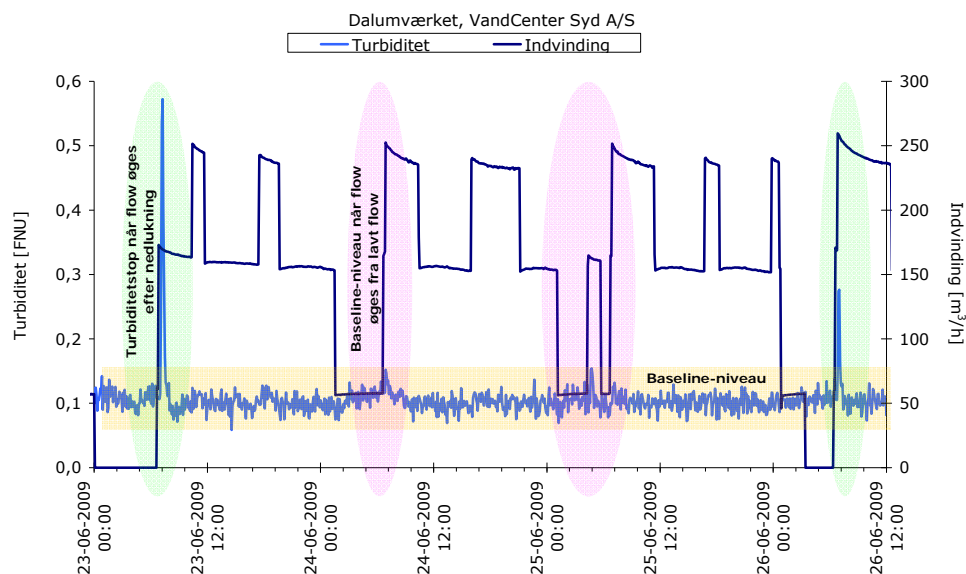
Sensormåledata for Dalumværket er sammenholdt med driftsdata for uge 19-26 2009 baseret på 5 min-værdier (Figur 20 - Figur 27).

#### Indvindingsflow

Indvindingen var som regel lukket 4-8 timer om natten og startede op med et flow på 170-270 m<sup>3</sup>/h om morgenen. Om dagen var indvindingen mellem 50 og 270 m<sup>3</sup>/h med toppe i indvindingen om morgenen, over middagstimerne og om aftenen.

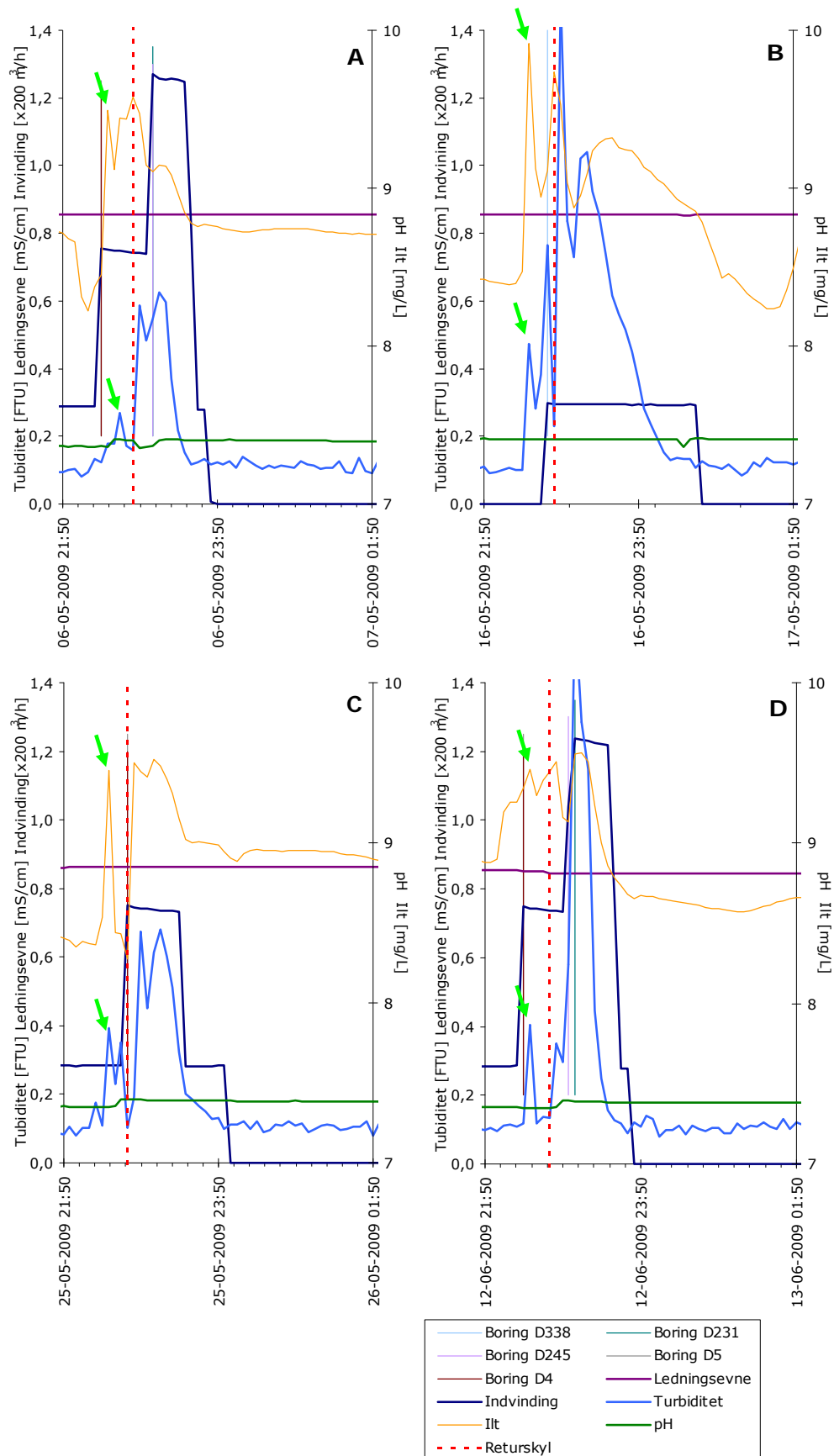
### Turbiditet

Turbiditeten lå på et stabilt lavt baseline-niveau på 0,06-0,15 FTU. Opstart om morgenen med øjeblikkelig (over 10 min) stigning i flowet til 170-270 m<sup>3</sup>/h efter nat uden indvinding resulterede i en kortvarig top (10-20 minutter) i turbiditeten med 0,25-0,60 FTU. Blev flowet øget tilsvarende fra et lavt flow forblev turbiditeten derimod på baseline-niveauet (eksempler i Figur 16). Turbiditetstoppe fra opstart efter en nat uden flow vil formentlig blive udjævnet i rentvandstanken, så kvalitetskravet på 0,3 FNU overholdes ved afgang værk, men toppene vil sandsynligvis kunne minimeres ved at køre med en lav produktion i nattetimerne eller ved at starte indvindingsflowet mere gradvist op om morgnen.

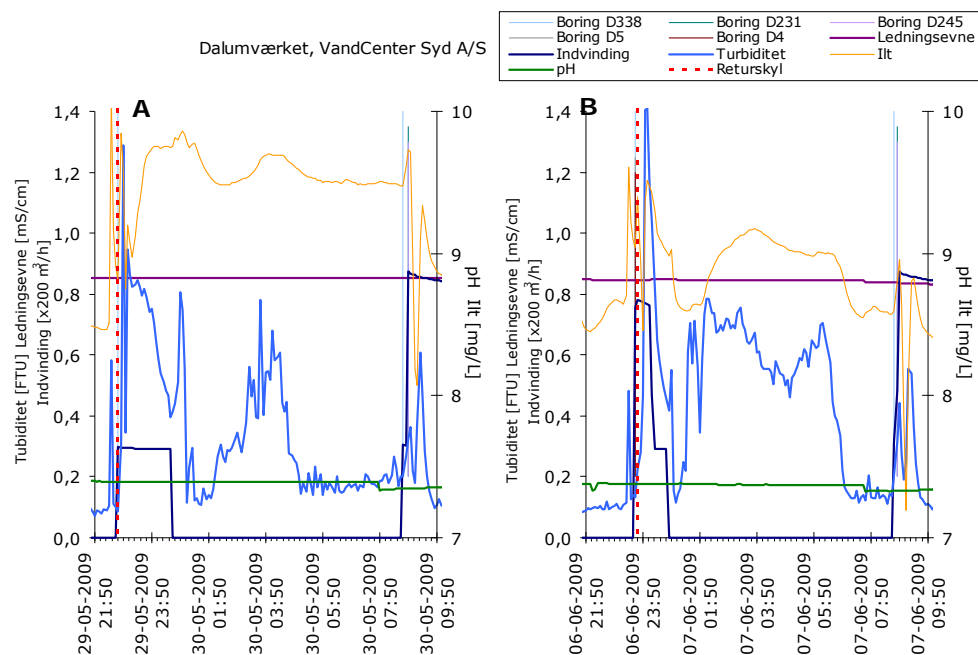


Figur 16: Eksempler på indvindingsflowets betydning på turbiditeten som 5-min værdier (udsnit af Figur 27), Dalumværket, VandCenter Syd A/S. Ilt- og turbiditetssensor placeret ved fælles filterafgang.

Når det ene af de tre filtre blev taget ud af produktion for at blive returskyllet, blev flowet fordelt på de to øvrige filtre, der dermed blev ekstra belastet. Dette medførte en mindre (0,15-0,40 FNU over udgangsniveauet) kort (ca. 10 min) turbiditetstop ved start af et returskyl (eksempler angivet med grønne pile i Figur 17). Opstart af et filter efter returskyl gav anledning til høje toppe (0,6-1,6 FTU), der generelt aftog til baseline-niveauet indenfor 40 min-1½ time (eksempler i Figur 17). Den tidsmæssige udstrækning af toppene afhang af flowet, så toppen blev trukket ud over natten, hvis indvindingen blev stoppet for natten, før turbiditetstoppen havde nået baseline-niveauet (eksempler i Figur 18). Da turbiditetstoppe efter et enkelt returskyl var relativ kortvarig og med en trods alt relativ lav maksimal turbiditet, vil effekten af et enkelt returskyl formentlig i de fleste tilfælde blive udjævnet ved opblanding i rentvandstanken. Eventuelle overskridelser af kvalitetsværdien ved afgang værk på turbiditeten vil formentlig være af mindre størrelsesorden og kortvarig.

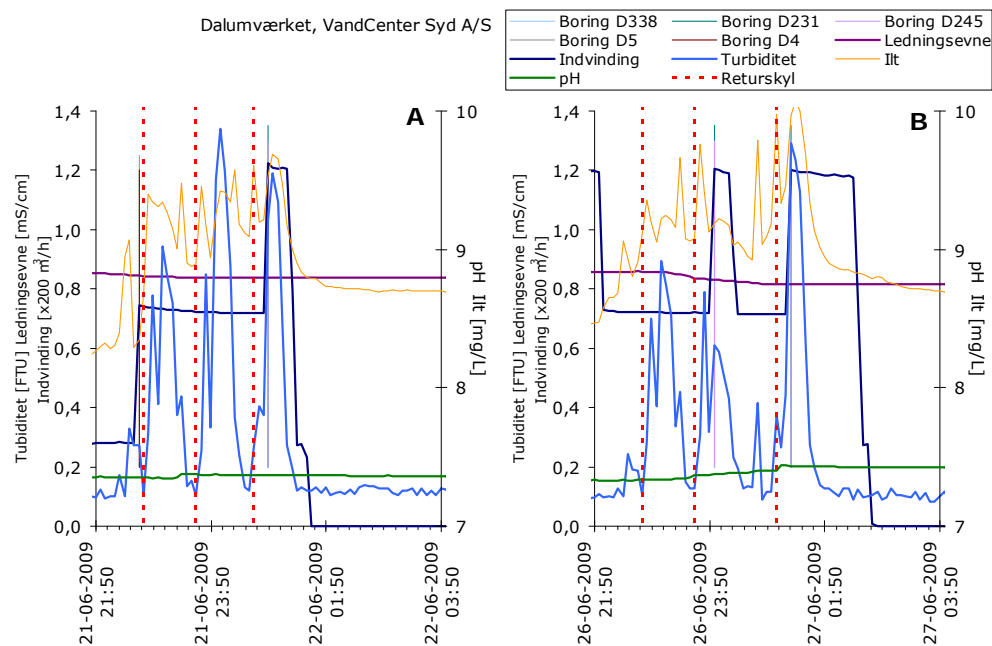


Figur 17: Eksempler på returskyls påvirkning af turbiditet og iltkoncentration som 5-min værdier (udsnit af a: Figur 20, B: Figur 21, C: Figur 23, D: Figur 24), Dalumværket, VandCenter Syd A/S. Grønne pile angiver turbiditetstop forårsaget af øget belastning (flow) på to øvrige filtre, når ene filter tages ud af produktion til returskyl. 'Returskyl' angiver tidspunkt for opstart af filter efter returskyl. Ilt- og turbiditetssensor placeret ved fælles filterafgang.



Figur 18: Eksempler på hvorledes toppe i turbiditet og iltkoncentration trækkes ud, når indvindingsflowet lukkes ned for natten før turbiditet og iltkoncentrationen er returneret til baseline-niveauet baseret på 5-min værdier, dalumværket, VandCenter Syd A/S (udsnit af A: Figur 23, B: Figur 24). 'Returskyl' angiver tidspunkt for opstart af filter efter returskyl. Ilt- og turbiditetssensor placeret ved fælles filterafgang.

I uge 19-26 2009 var der afvigelser i returskyl-proceduren i forbindelse med de månedlige kontrolundersøgelser. Manuelle skyl blev udført over middag d. 7/5 (Figur 20) og d. 15/6 (Figur 26) efter anden procedure end det automatiske filterskyl. Den 15/6 blev alle tre filtre returskyllet og volumen-tælleren dermed nulstillet, så de efterfølgende returskyl (21/6 og 26/6) faldt samtidig for alle tre filtre (returskyl med ca. en times mellemrum – fremhævet i Figur 19).



Figur 19: Eksempler på profil af turbiditet og iltkoncentration ved tre på hinanden følgende returskyl baseret på 5-min værdier, dalumværket, VandCenter Syd A/S (udsnit af A: Figur 26, B: Figur 27). 'Returskyl' angiver tidspunkt for opstart af filter efter returskyl. Ilt- og turbiditetssensor placeret ved fælles filterafgang.

Hvert enkelt opstart efter disse returskyl resulterede i høje turbiditetstoppe, der aftog til baseline-niveauet indenfor en time. Disse sammenfaldende turbiditetstoppe vil næppe blive udjævnet via opblanding i rentvandstanken. Det bør formodentligt undgås, at de tre filtre returskylles samtidigt for at overholde kvalitetsværdien ved afgang værk, fx ved ikke at nulstille de enkelte filters volumentællere samtidig eller indlægge en regel i SRO-systemet om, at der mindst skal gå et døgn imellem returskyl af filtrene.

### Ilt

Iltsensoren var placeret efter filtrene, og den målte iltkoncentration var således et resultat af både iltningseffektiviteten, forbrug i filtrene og returskyl. Iltkoncentrationen svingede generelt indenfor et baseline-niveau på 8,0-9,3 mg/L. Luftningsenheden reguleres efter indvindingsflowet, men har brug for lidt omstillingstid ved flowændringer, så ved fald i flowet steg iltkoncentrationen kortvarigt til den øvre ende af baseline-niveauet og ved øget flow faldt iltkoncentrationen til den nedre del af baseline-niveauet. Opstart efter en nat uden indvindingsflow resulterede i et fald i iltkoncentrationen til 6,6 mg/L. Indstillingsperioden – og dermed udslag i iltkoncentration – var kortere i forbindelse med stigning i flow end ved fald i flow.

Returskyl af filtrene påvirkede iltkoncentrationen efter filtrene. Den øgede belastning af de øvrige filtre, når et filter blev taget ud af produktion for at blive returskyllet, kunne ses som en kortvarig top i iltkoncentrationen (op til 1,5 mg/L over øvrige niveau) sammenfaldende med turbiditetstoppen (eksempler angivet med grønne pile i Figur 17). Når et filter blev opstartet efter returskyl, medførte det ligeledes en top i iltkoncentrationen samtidig med toppen i turbiditeten. Dette skyldtes luft fanget i filtret fra skyllet med vand og luft under returskyllet (eksempler fremhævet i Figur 17-Figur 19).

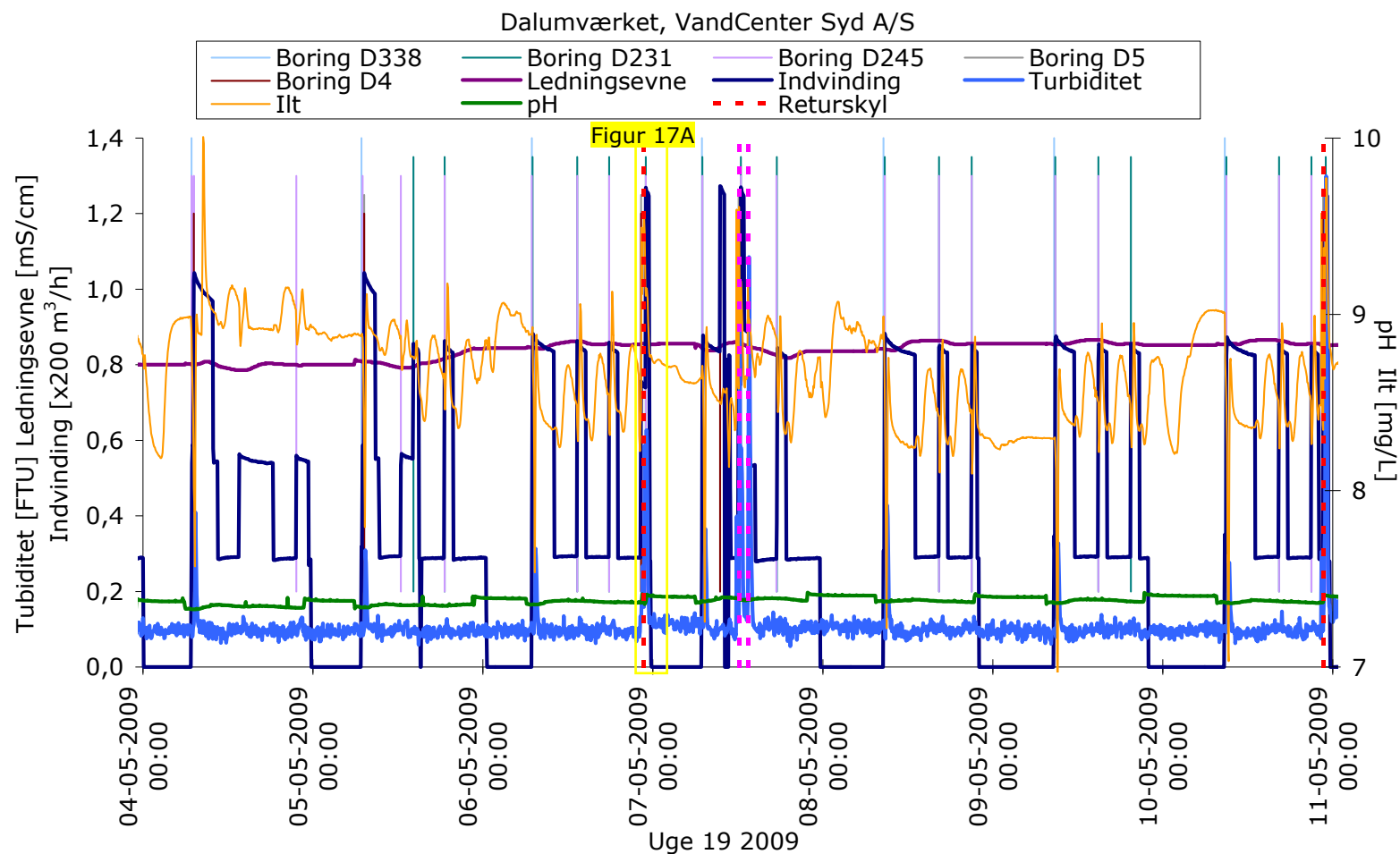
### Ledningsevne

Ledningsevnen ved afgang værk lå indenfor et fast baseline-niveau på 77-88 S/cm. Mindre variationer var knyttet til variation i råvandsboringer (Ledningsevne på 97 mS/m i råvand fra boring D231, 72-80 mS/m fra øvrige boringer).

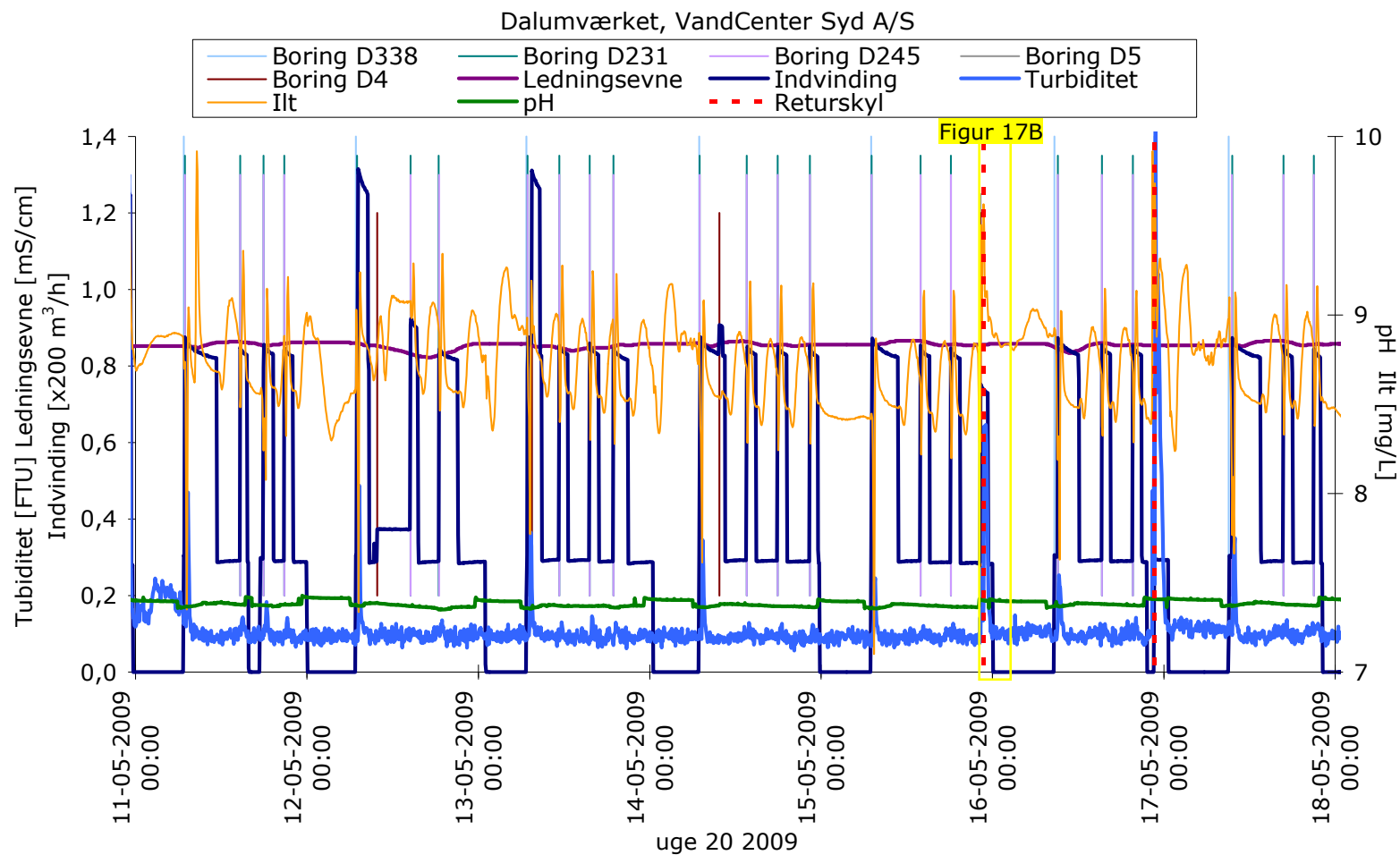
### pH

pH ved afgang værk lå konstant indenfor et baseline-niveau på 7,31- 7,41. Et kortvarigt kraftigt fald i pH registret 28/5 (Figur 23) skyldtes kalibrering af pH-sensoren. Af hensyn til reaktion på alarmer bør driftspersonalet selvfølgelig være opmærksom på kalibreringstidspunkter.

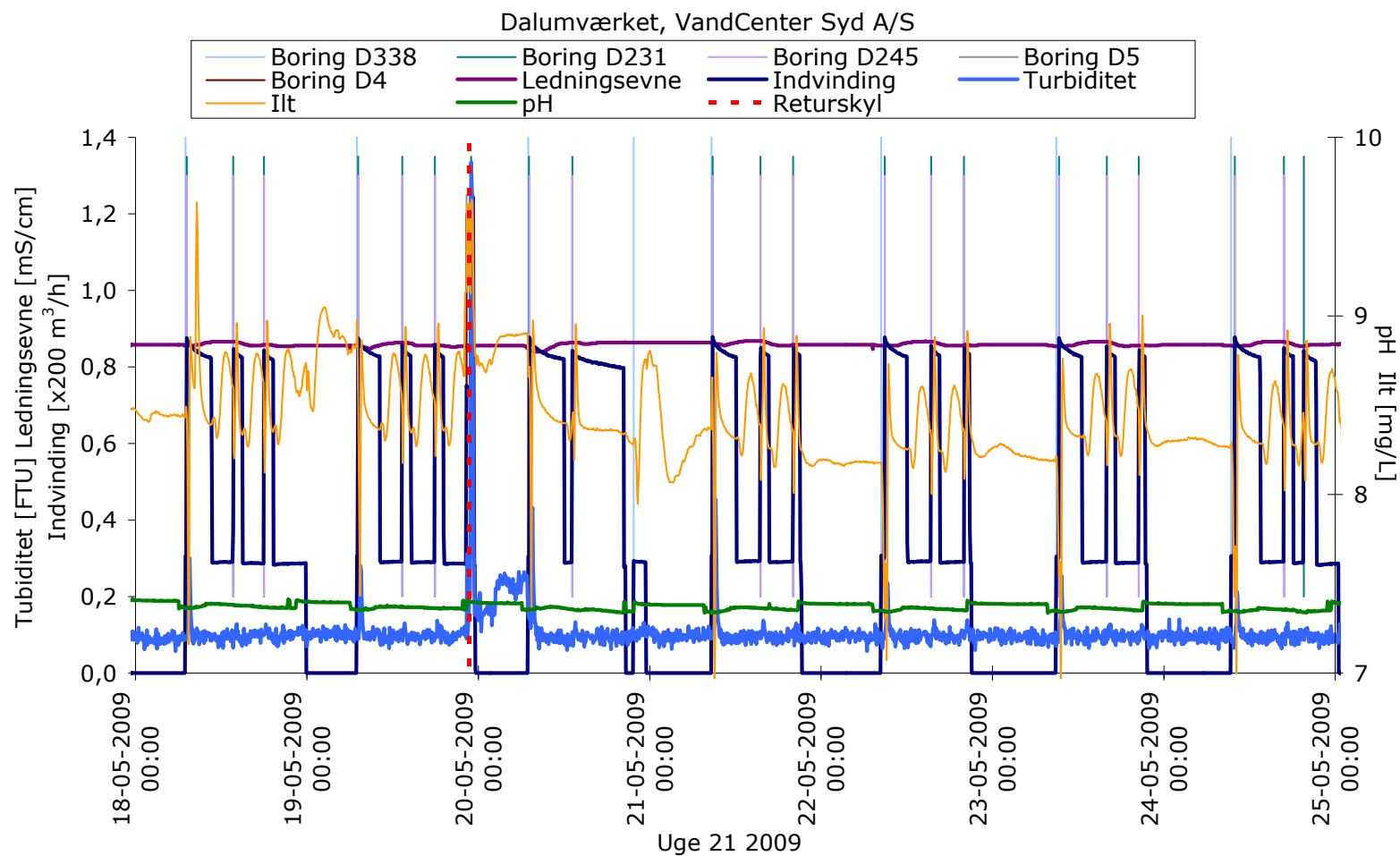




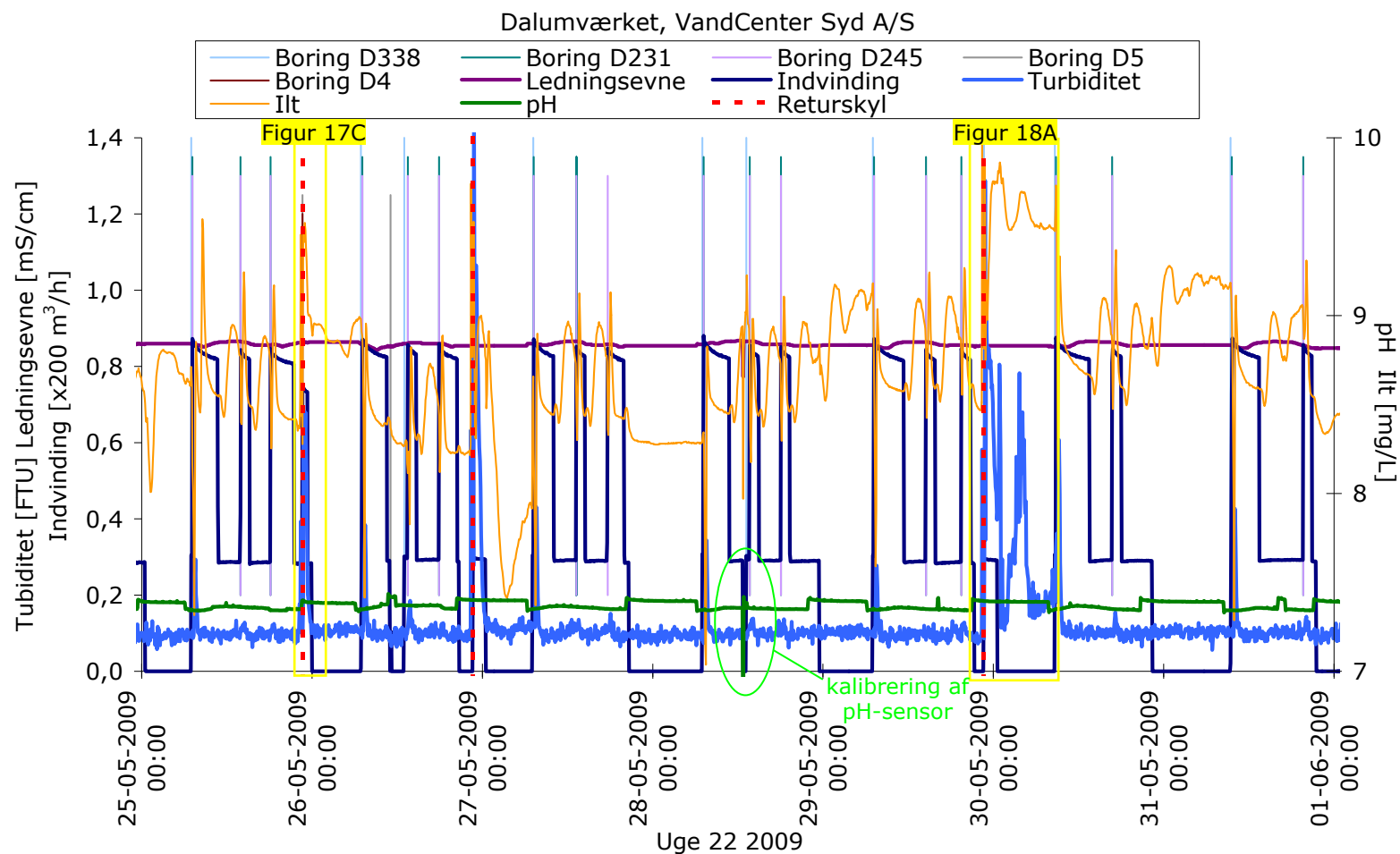
Figur 20: Sensormålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Dalumværket, VandCenter Syd A/S for uge 19 2009. Sensorer for ilt og turbiditet installeret ved fælles filterafgang, sensorer for Ledningsevne og pH efter rentvandstank ved afgang værk. 'Returskyl' angiver tidspunkt for opstart af filter efter returskyl. Pink markering af 'returskyl' angiver manuelle kontrolskyl. Boring # angiver opstart af indvinding fra boring #.



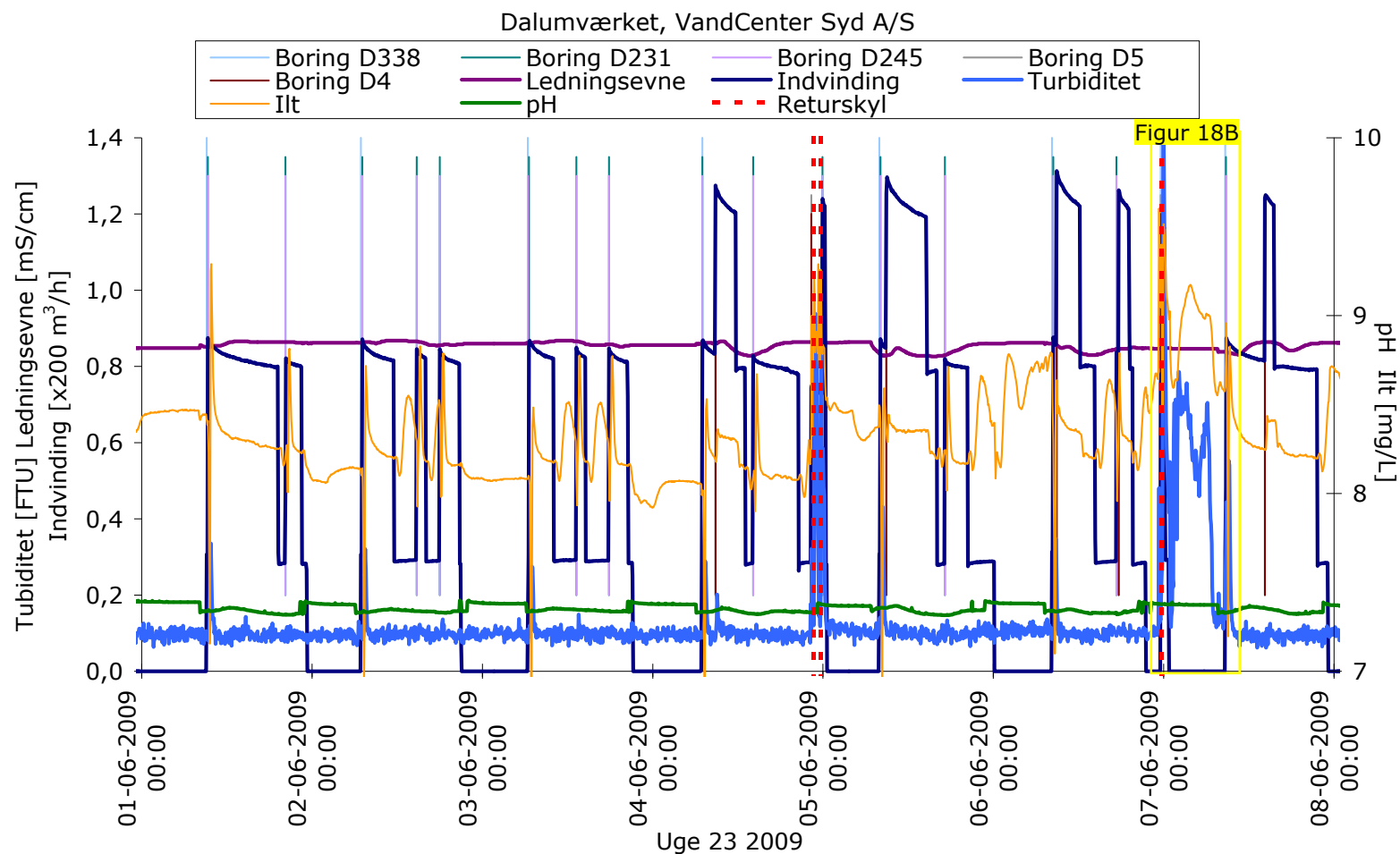
Figur 21: Sensormålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Dalumværket, VandCenter Syd A/S for uge 20 2009. Sensorer for ilt og turbiditet installeret ved fælles filterafgang, sensorer for Ledningsevne og pH efter rentvandstank ved afgang værk. 'Returskyl' angiver tidspunkt for opstart af filter efter returskyl. Pink markering af 'returskyl' angiver manuelle kontrolskyl. Boring # angiver opstart af indvinding fra boring #.



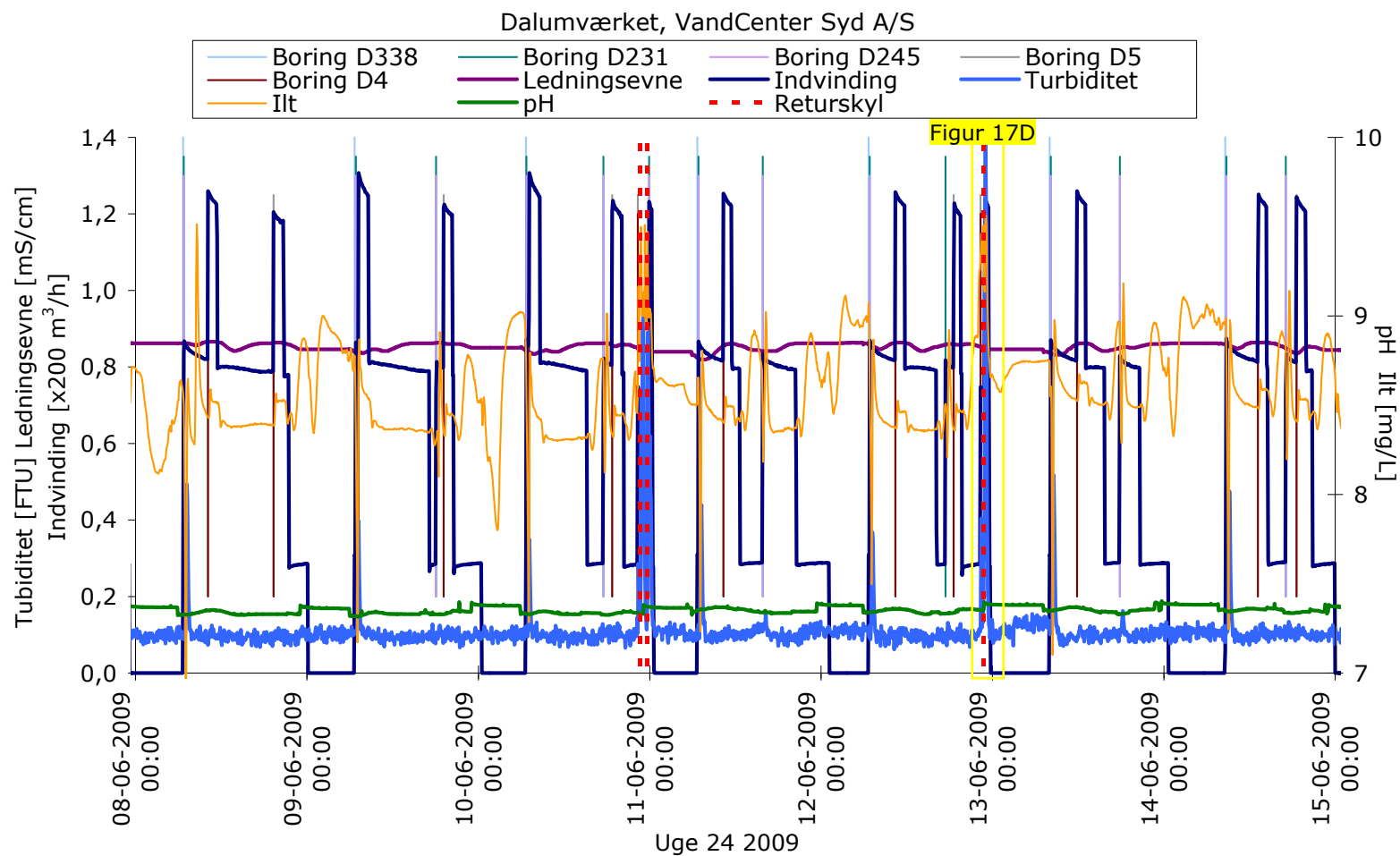
Figur 22: Sensormålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Dalumværket, VandCenter Syd A/S for uge 21 2009. Sensorer for ilt og turbiditet installeret ved fælles filterafgang, sensorer for Ledningsevne og pH efter rentvandstank ved afgang værk. 'Returskyl' angiver tidspunkt for opstart af filter efter returskyl. Pink markering af 'returskyl' angiver manuelle kontrolskyl. Boring # angiver opstart af indvinding fra boring #.



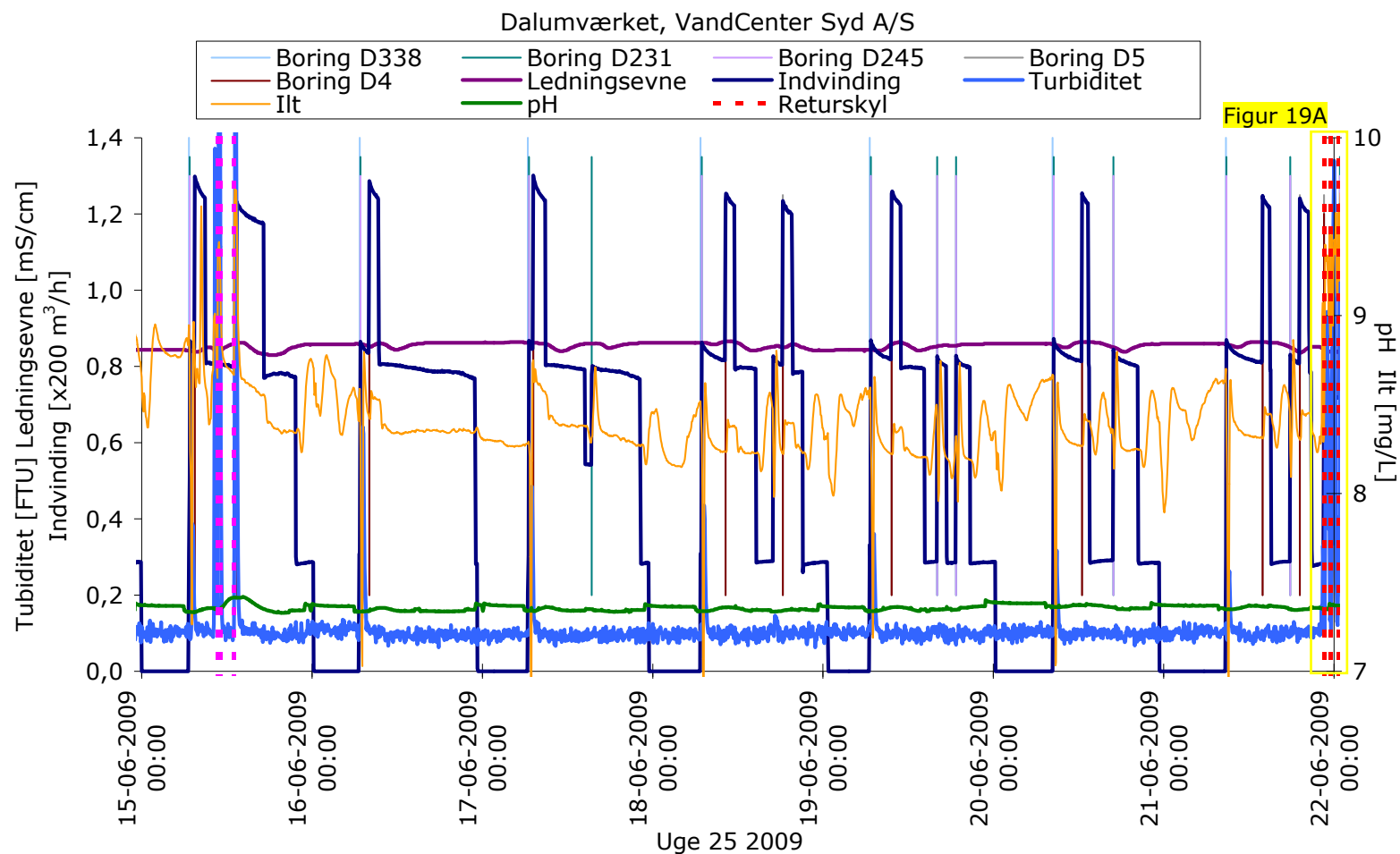
Figur 23: Sensormålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Dalumværket, VandCenter Syd A/S for uge 22 2009. Sensorer for ilt og turbiditet installeret ved fælles filterafgang, sensorer for Ledningsevne og pH efter rentvandstank ved afgang værk. 'Returskyl' angiver tidspunkt for opstart af filter efter returskyl. Pink markering af 'returskyl' angiver manuelle kontrolskyl. Boring # angiver opstart af indvinding fra boring #.



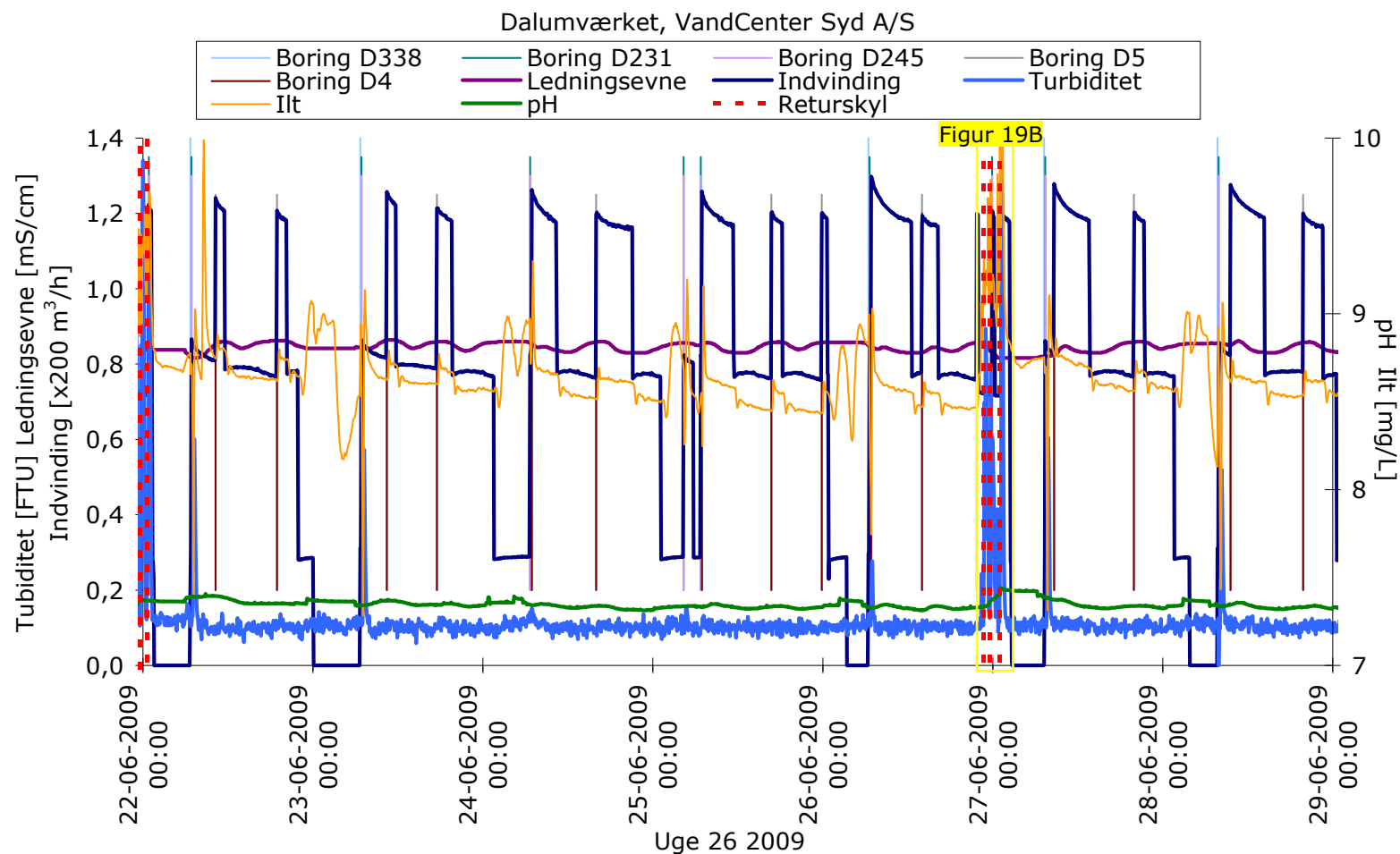
Figur 24: Sensormålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Dalumværket, VandCenter Syd A/S for uge 23 2009. Sensorer for ilt og turbiditet installeret ved fælles filterafgang, sensorer for Ledningsevne og pH efter rentvandstank ved afgang værk. 'Returskyl' angiver tidspunkt for opstart af filter efter returskyl. Pink markering af 'returskyl' angiver manuelle kontrolskyl. Boring # angiver opstart af indvinding fra boring #.



Figur 25: Sensormålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Dalumværket, VandCenter Syd A/S for uge 24 2009. Sensorer for ilt og turbiditet installeret ved fælles filterafgang, sensorer for Ledningsevne og pH efter rentvandstank ved afgang værk. 'Returskyl' angiver tidspunkt for opstart af filter efter returskyl. Pink markering af 'returskyl' angiver manuelle kontrolskyl. Boring # angiver opstart af indvinding fra boring #.



Figur 26: Sensormålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Dalumværket, VandCenter Syd A/S for uge 25 2009. Sensorer for ilt og turbiditet installeret ved fælles filterafgang, sensorer for Ledningsevne og pH efter rentvandstank ved afgang værk. 'Returskyl' angiver tidspunkt for opstart af filter efter returskyl. Pink markering af 'returskyl' angiver manuelle kontrolskyl. Boring # angiver opstart af indvinding fra boring #.



Figur 27: Sensormålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Dalumværket, VandCenter Syd A/S for uge 26 2009. Sensorer for ilt og turbiditet installeret ved fælles filterafgang, sensorer for Ledningsevne og pH efter rentvandstank ved afgang værk. 'Returskyl' angiver tidspunkt for opstart af filter efter returskyl. Pink markering af 'returskyl' angiver manuelle kontrolskyl. Boring # angiver opstart af indvinding fra boring #.



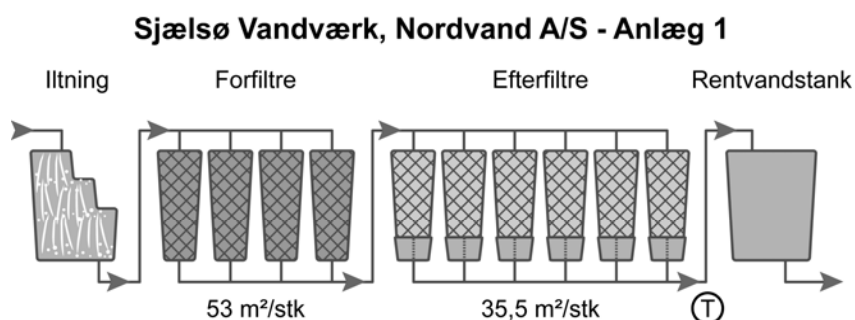
### 3.4 Sjælsø vandværk, Nordvand A/S

Sjælsø vandværk består af 2 parallelle behandlingsanlæg, anlæg 1 og anlæg 2, der producerer uafhængigt af hinanden, men leder vand til samme rentvandstank. Produktionen på ca. 5,5 mio m<sup>3</sup>/år (ca. 15.000 m<sup>3</sup>/døgn) søges fordelt ligeligt på de to anlæg. Der produceres døgnet rundt med døgnvariationer, der via SRO-systemet kontinuerligt styres efter forbruget med høj frekvens af start-stop af boringspumper (ned til 5 min aktivering af boringspumper). Der er installeret turbiditetssensorer ved afgang anlæg 1, afgang anlæg 2 og den fælles rentvandsafgang. Sensordata er ikke pålagt alarmer, men 'normal'-niveauer ligger som en erfaring hos værkets driftspersonale, der reagerer på opståede afvigelse.

#### 3.4.1 Anlæg 1

Anlæg 1 modtager vand fra Sandholm kildeplads (9 boringer - ydelser mellem 29-89 m<sup>3</sup>/time) og Nebbegård kildeplads (4 boringer - ydelser mellem 66-88 m<sup>3</sup>/time) med en gennemsnitlig fordeling af indvindingen med ca. 80% fra Sandholm kildeplads og 20% fra Nebbegård kildeplads. Behandlingen på anlæg 1 består af en luftningstrappe efterfulgt af 4 forfiltre (hver på 53 m<sup>2</sup>) og 6 efterfiltre (hver på 35,5 m<sup>2</sup>), der hver er bygget med to underliggende kamre, som vandet passerer, inden det ledes til den fælles rentvandstank (Figur 28).

Forfiltrene returskylles to og to (1+2 og 3+4 - med en times forskydning imellem de to filtre, der skylles sammen), når 24.000 m<sup>3</sup> vand har passeret det enkelte filter (i snit hver 3.-5. dag). Filtrene returskylles over 21 minutter (10 min sænkning, 6 min vand+luft, 1 min pause, 3 min vand, 1,15 min sænkning), hvorefter de ligger stille 31 minutter inden opstart. Efterfiltrene returskylles enkeltvis, når 12.000 m<sup>3</sup> vand har passeret det enkelte filter (i snit hver 6.-9. dag). Filtrene returskylles over 14 minutter (5 min sænkning, 6,30 min vand+luft, 2,30 min vand), hvorefter filtret ligger stille i 33 minutter inden opstart.



Figur 28: Skitse af vandbehandlingen på Sjælsø Vandværk anlæg 1, Nordvand A/S med angivelse af sensorplacering.

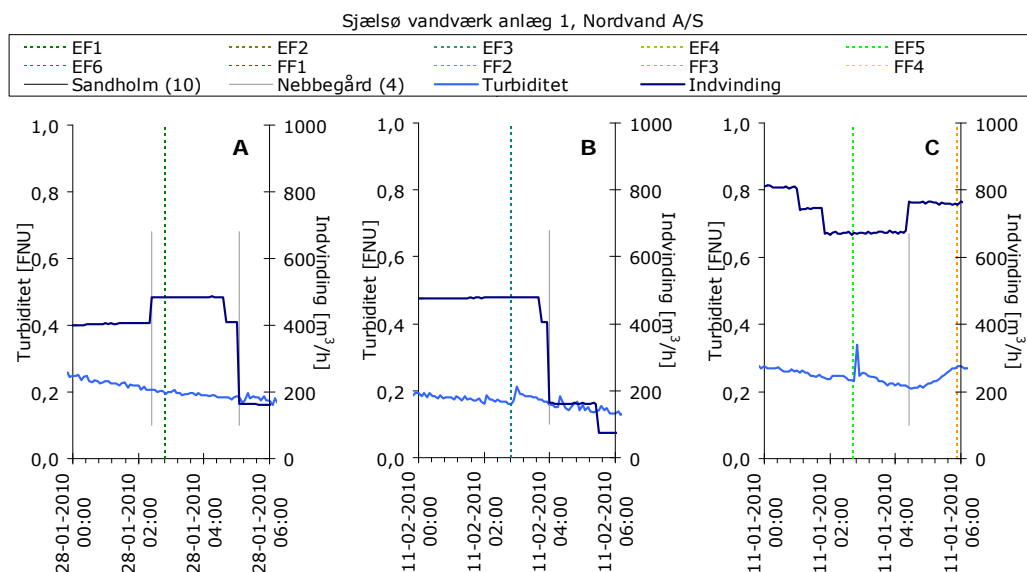
Turbiditetsmålinger er sammenholdt med driftsdata for januar og februar måned 2010 baseret på 5 min-værdier (Figur 32 - Figur 39).

#### Indvindingsflow

Variationer i indvindingen medførte i perioden 1220 boringsaktiveringer. Den samlede indvinding havde minimumsniveauer på 0-169 m<sup>3</sup>/h over 3-8 timer i morgentimerne (3-5 timer senere i weekenderne) og maksimumsniveauer på 700-800 m<sup>3</sup>/h over 9-15 timer i eftermiddags- og aften timerne.

## Turbiditet

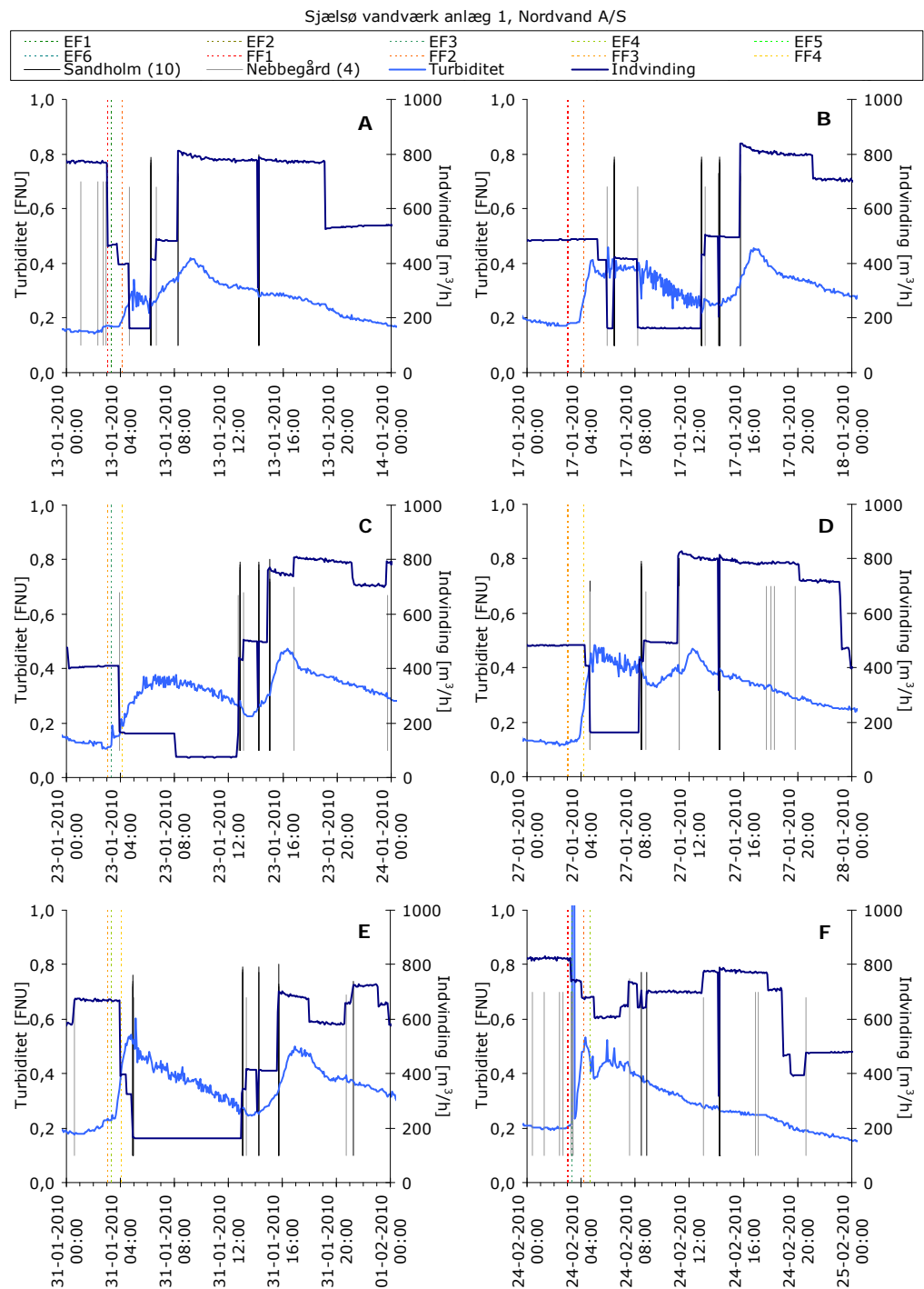
Opstart efter returskyl af efterfiltrene havde kun lille (stigning på 0,02-0,10 FNU, størrelsesorden af 20 min) eller ingen effekt på turbiditeten målt efter efterfiltrene (eksempler fra Figur 32 - Figur 39 fremhævet i Figur 29).



Figur 29: Eksempler på turbiditetsprofiler som 5-min værdier målt efter efterfiltrene ved opstart af efterfiltre efter returskyl under forskellige indvindingsflow (udsnit af A: Figur 35, B: Figur 37, C: Figur 33), Sjælsø vandværk anlæg 1, Nordvand A/S. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Sandholm og Nebbegård angiver boreropstart af boring på de respektive kildepladser, taL i () angiver antal af boringer på pågældende kildeplads.

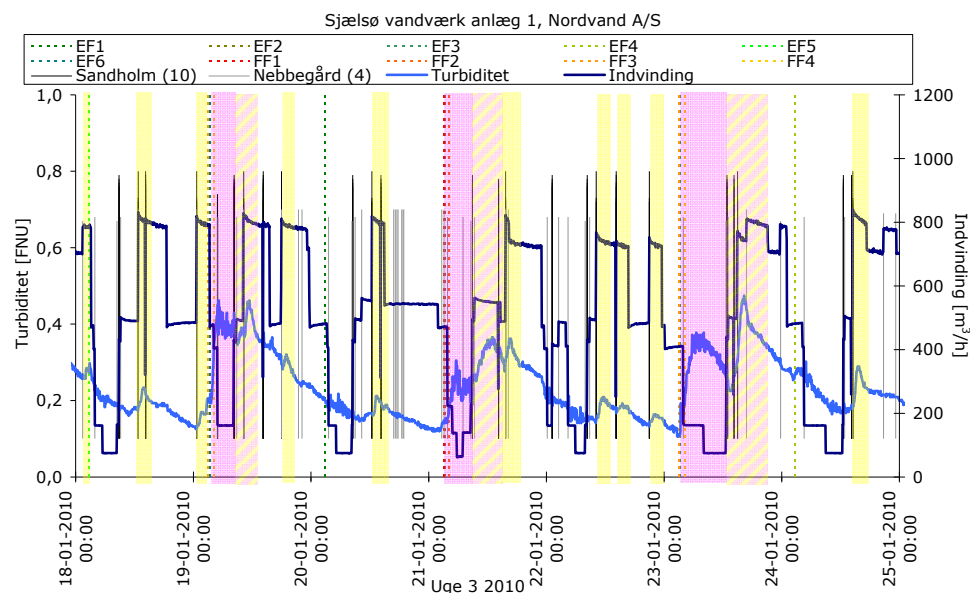
Opstart efter returskyl af forfiltre gav anledning til længerevarende niveauændringer i turbiditeten målt efter efterfiltrene, generelt med stigninger på 0,2-0,4 FNU til niveauer 0,4-0,5 FNU (eksempler fra Figur 32 - Figur 39 fremhævet i Figur 30). Turbiditetsstigningen fremstod som to på hinanden følgende toppe, der derefter aftog over 1-2 døgn til et niveau 0,15 FNU, forudsat et nyt returskyl ikke blev foretaget forinden. Toppenes højde og tidsmæssige udstrækning var stærkt afhængig af det aktuelle flow. Når flowet var lavt (under ca. 170 m<sup>3</sup>/h) lige efter opstart efter returskyl af forfiltre, blev den første top tidsmæssigt trukket ud i perioden med lavt flow i en længere (7-8 timer – eksempler fremhævet på Figur 30B,E) eller kortere periode (1-4 timer – eksempler fremhævet i Figur 30A, D). Ved et højt flow i perioden efter opstart lå de to toppe tæt på hinanden indenfor en fire timers periode (eksempel fremhævet i Figur 30F, mens de to toppe kunne strække sig over en periode på op til 13 timer med et gennemsnitligt lavere flow (eksempel fremhævet i Figur 30E). Flowprofilen formede således turbiditetsprofilen ved opstart af forfiltre efter returskyl.

Kraftig øgning af flowet medførte ligeledes en top i turbiditeten. Når flowet blev øget til omkring 800 m<sup>3</sup>/h fra et niveau  $\leq 400$  m<sup>3</sup>/h resulterede det i en kortvarig (størrelsesorden 3 timer) top i turbiditeten på 0,04-1,00 FNU, generelt med højere stigning jo lavere flowet var forinden. Øgning af flowet var således i forbindelse med toppe fra opstart af forfiltre efter returskyl med til at 'løfte' den anden top, da flowet generelt blev øget på dette tidspunkt. Årsagen til toppe i turbiditet er angivet for uge 3 2009 som eksempel (Figur 31).



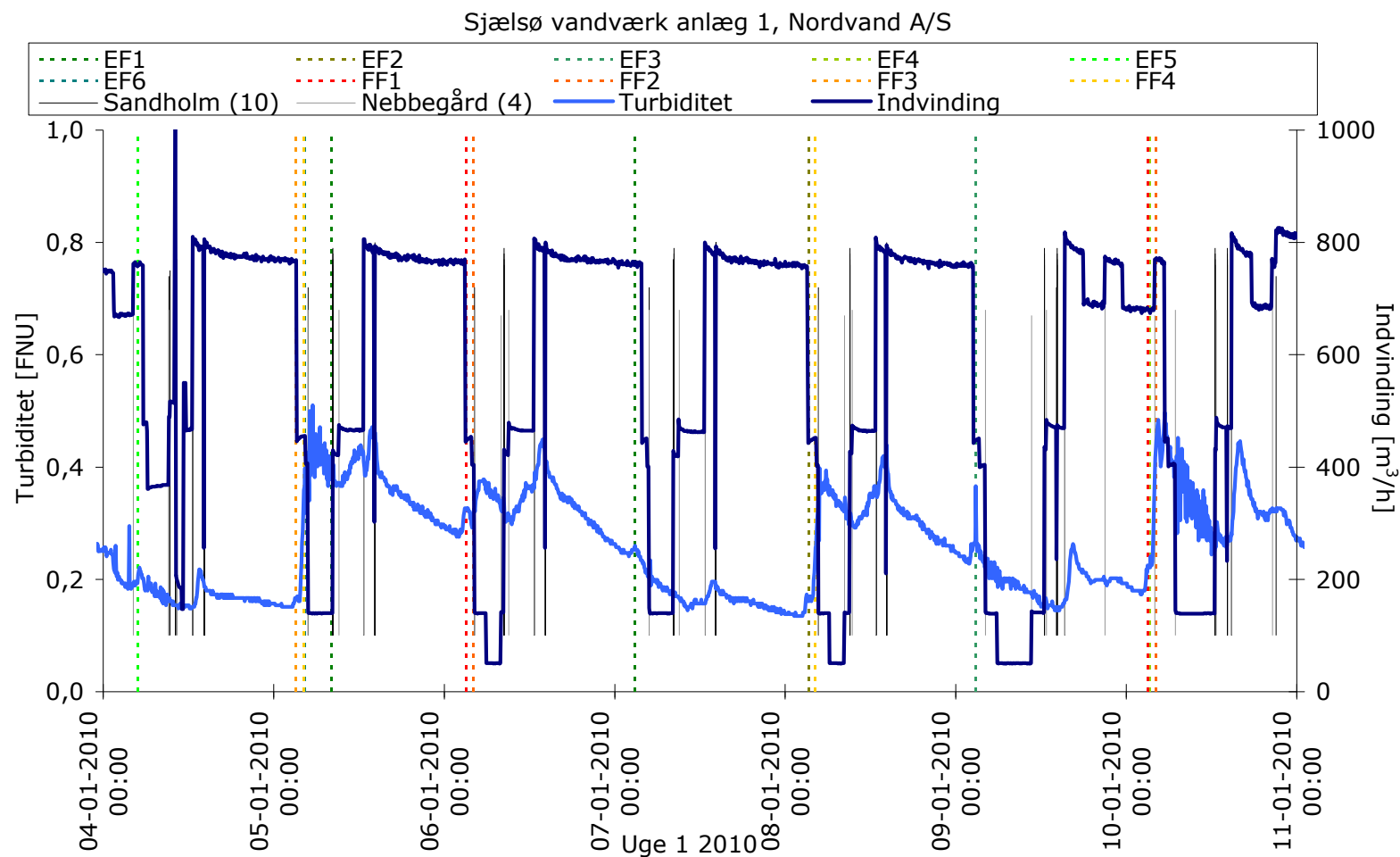
Figur 30: Eksempler på turbiditetsprofiler som 5-min værdier målt efter efterfiltrene ved opstart af forfiltre efter returskyl under forskellige indvindingsflow (udsnit af A: Figur 34, B: Figur 35, C: Figur 35, D: Figur 39), Sjælsø vandværk anlæg 1, Nordvand A/S. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Sandholm og Nebbegård angiver boringsoptart af boring på de respektive kildepladser, taL i () angiver antal af boringer på pågældende kildeplads.

Turbiditeten målt efter efterfiltrene var på et givet tidspunkt hovedsagelig et resultat af tiden siden opstart af forfiltre efter returskyl. Da returskyl af et sæt forfiltre forløb hver til hver anden dag med længerevarende toppe, lå turbiditeten efter efterfiltrene over 0,3 FNU i størstedelen af perioden.

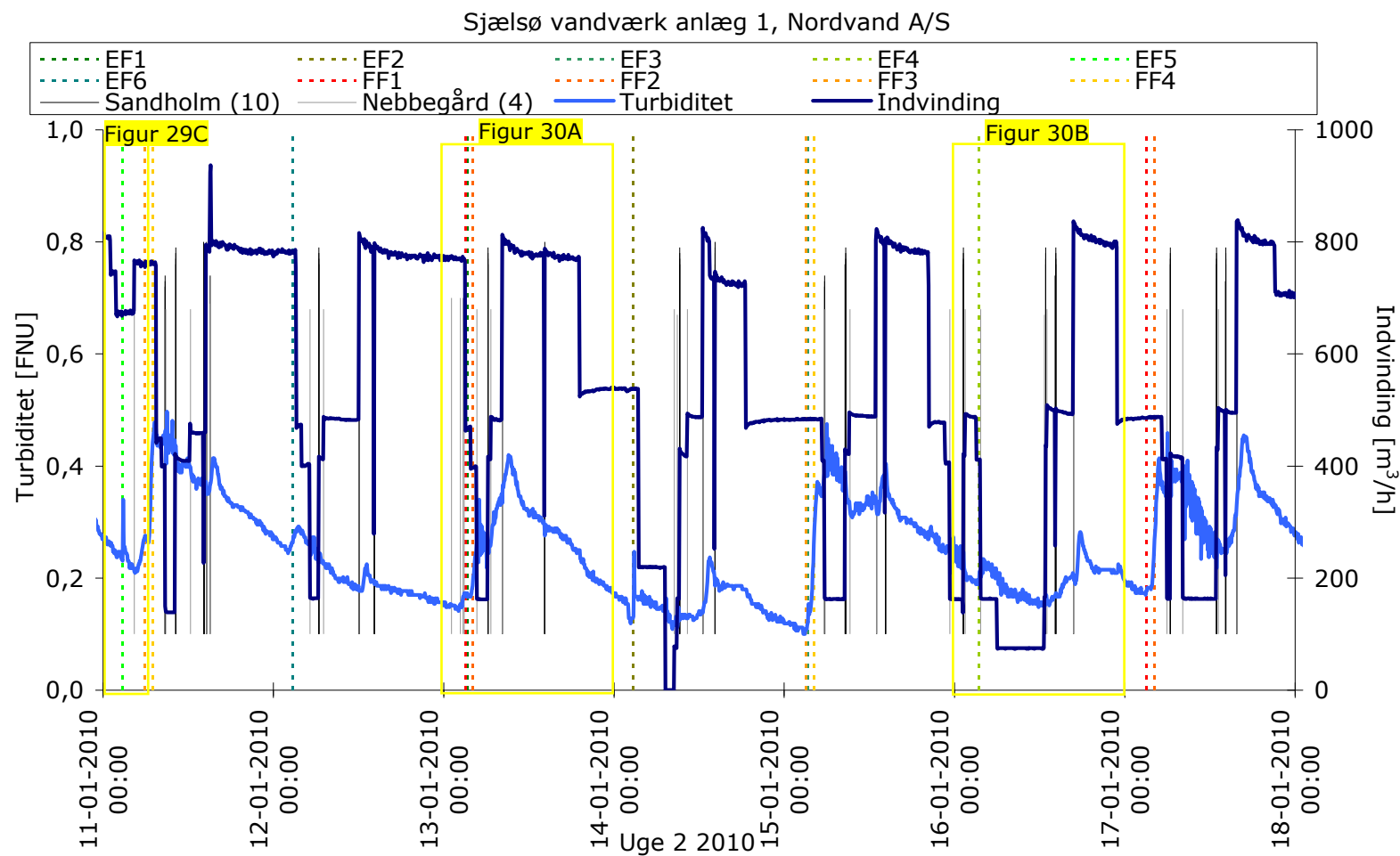


Figur 31: Årsagen til turbiditetstoppe målt efter efterfiltret for uge 3 2010, Sjælsø Vandværk anlæg 1, Nordvand A/S med angivelse af turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier. Rosa markering: opstart af forfilter efter returskyl; Gul markering: Øgning af flow fra niveau  $\leq 400 \text{ m}^3/\text{h}$  til niveau omkring  $800 \text{ m}^3/\text{h}$ ; skravering: Kombination af opstart efter returskyl og øgning af flowet. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Sandholm og Nebbegård angiver boringsopstart af boring på de respektive kildepladser, taL i () angiver antal af boringer på pågældende kildeplads.

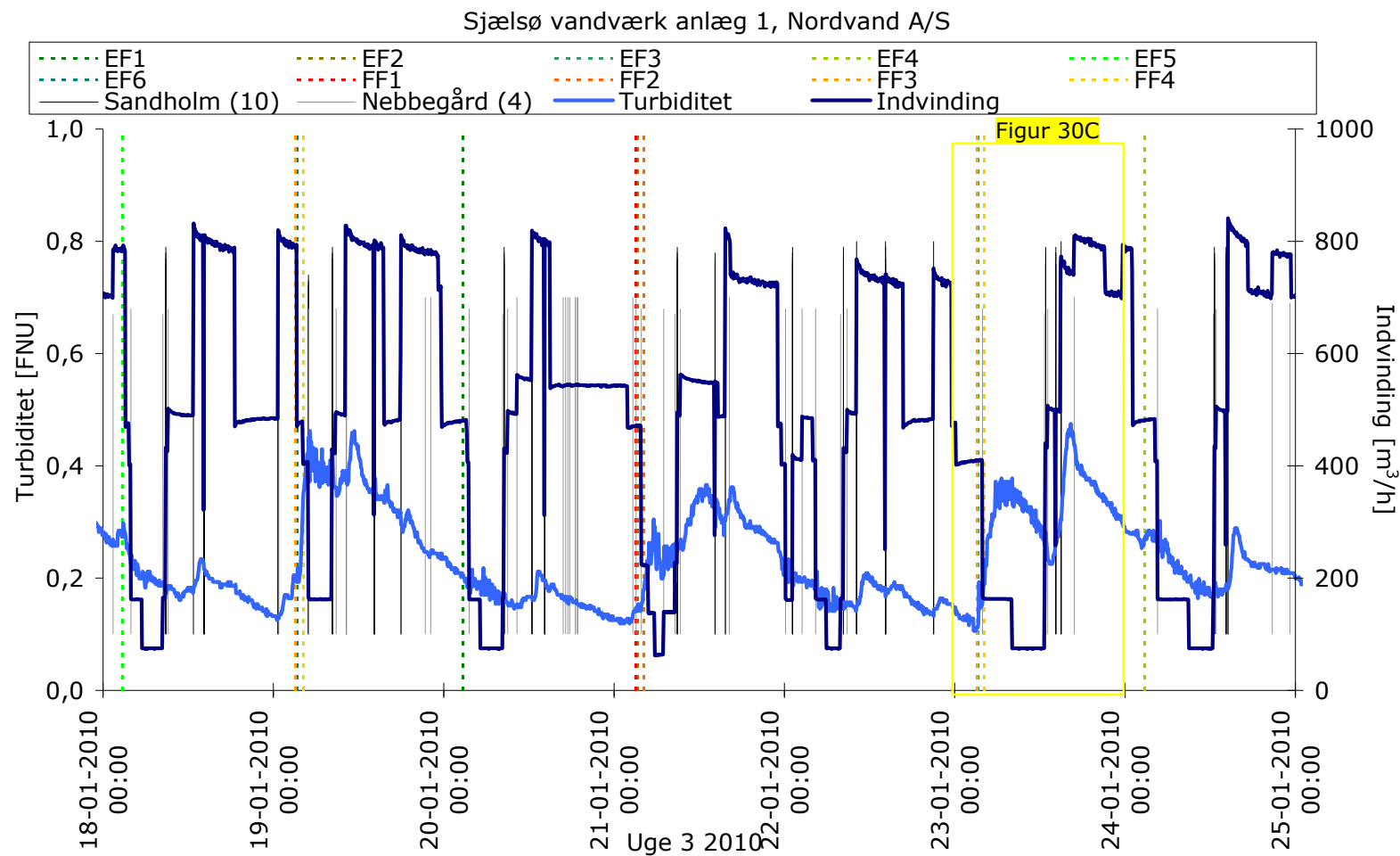
Jernindholdet i råvandet fra de to kildepladser er meget forskelligt, mens indholdet af mangan ( $0,01\text{-}0,26 \text{ mg/L}$  i boringer) og NVOC ( $2,0\text{-}3,1 \text{ mg/L}$  i boringer) var på samme niveau. Boringerne på Sandholm kildeplads indeholder  $3,5\text{-}5,0 \text{ mg Fe/L}$ , mens råvandet fra boringer på Nebbegård kildeplads indeholder  $0,26\text{-}0,85 \text{ mg Fe/L}$ . Det er således mængden af vand fra Sandholm, der går over filtret imellem to returskyl, der primært har indflydelse på hvor meget jern, der afsættes i forfiltrene. Da der kan være 10% forskel på vandmængden fra Sandbjerg imellem to returskyl af forfiltre, vil mængden af afsat jern variere, hvilket også kan påvirke turbiditetesprofilen efter opstart af filtre efter returskyl af forfiltre.



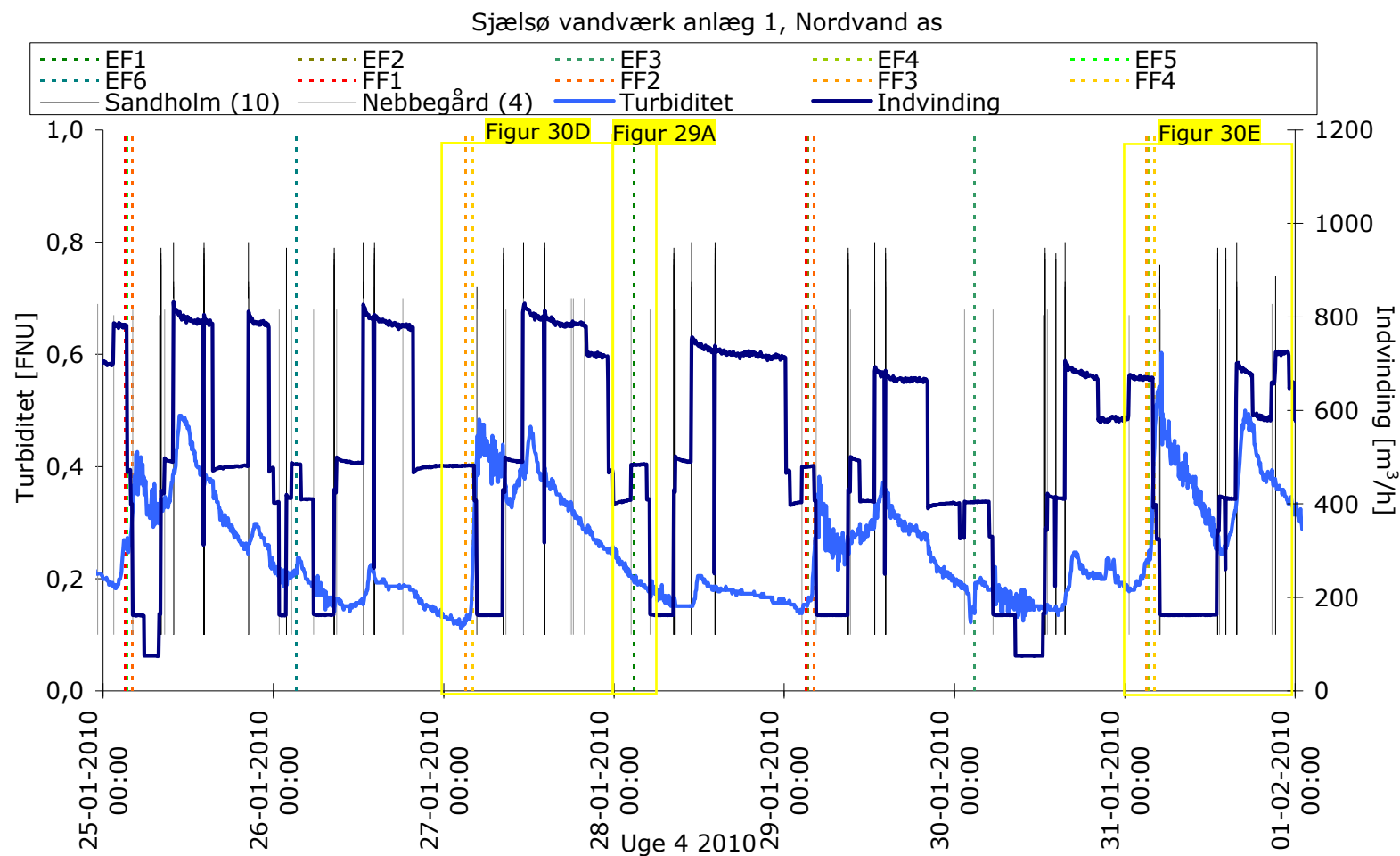
Figur 32: Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 1, Nordvand A/S for uge 1 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Sandholm og Nebbegård angiver boringsopstart af boring på de respektive kildepladser, taL i () angiver antal af boringer på pågældende kildeplads.



Figur 33: Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 1, Nordvand A/S for uge 2 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Sandholm og Nebbegård angiver boringsopstart af boring på de respektive kildepladser, taL i () angiver antal af boringer på pågældende kildeplads.

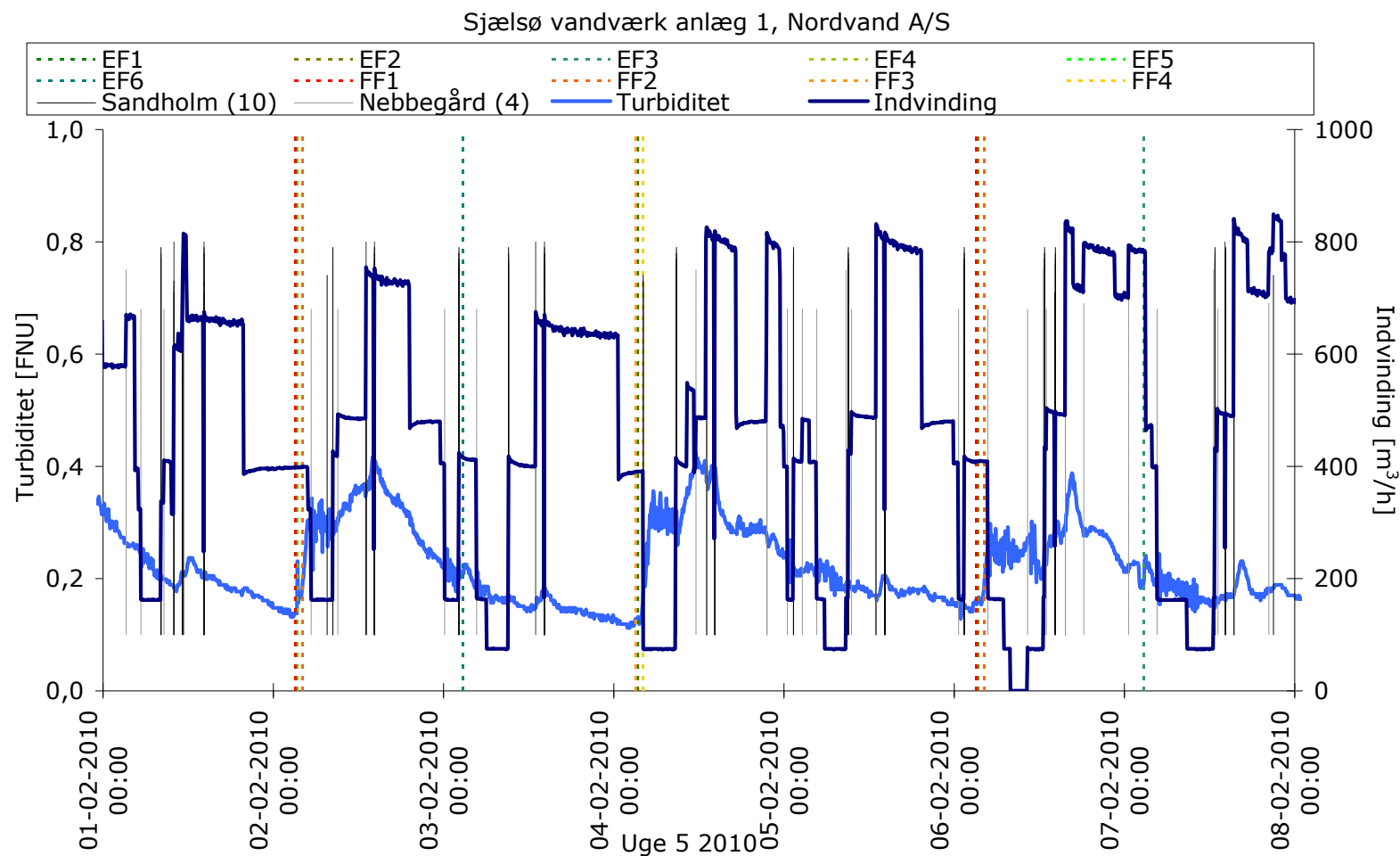


Figur 34: Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 1, Nordvand A/S for uge 3 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Sandholm og Nebbegård angiver boringsopstart af boring på de respektive kildepladser, taL i () angiver antal af boringer på pågældende kildeplads.

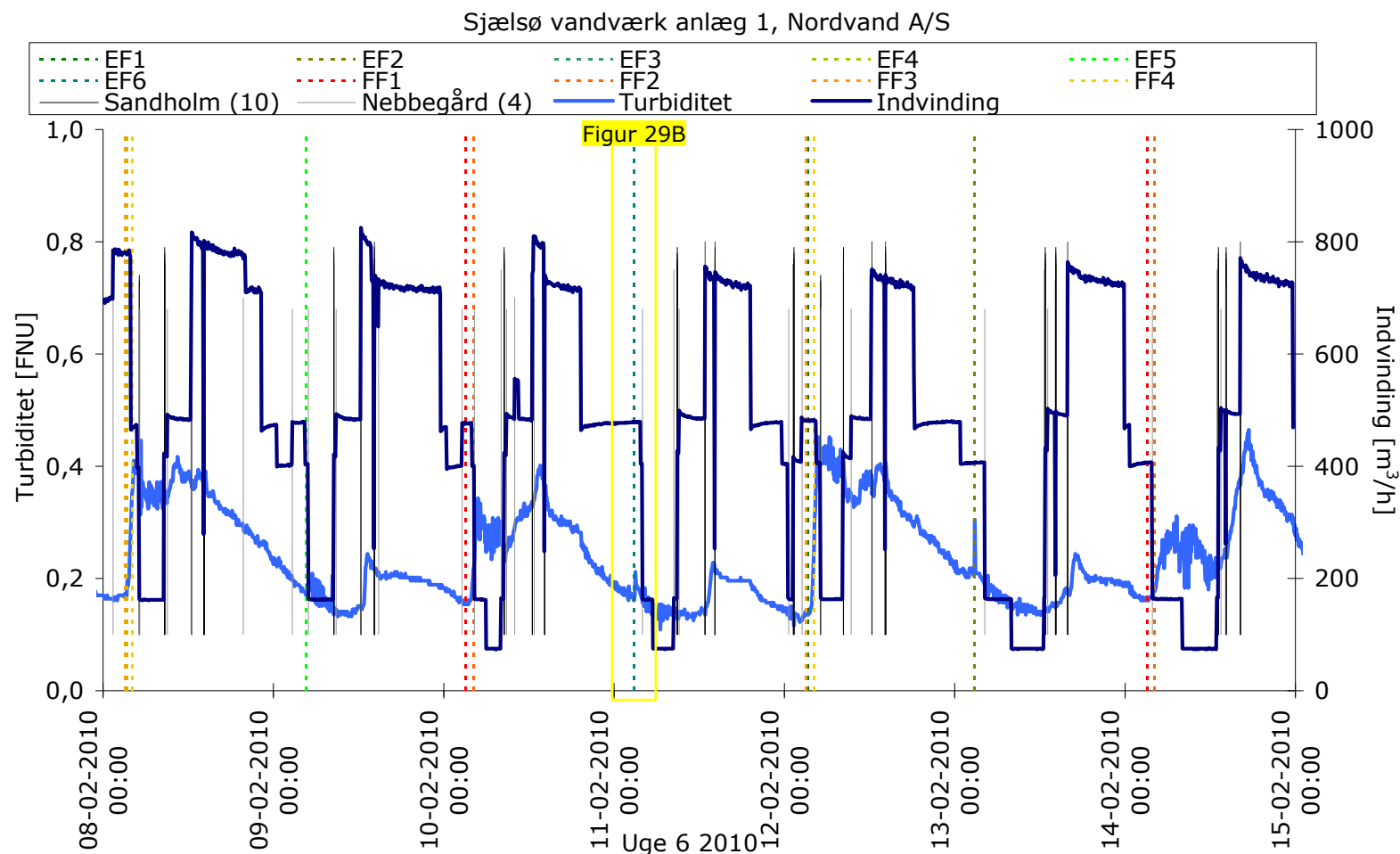


Figur 35: Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 1, Nordvand A/S for uge 4 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Sandholm og Nebbegård angiver boringsopstart af boring på de respektive kildepladser, taL i () angiver antal af boringer på pågældende kildeplads.

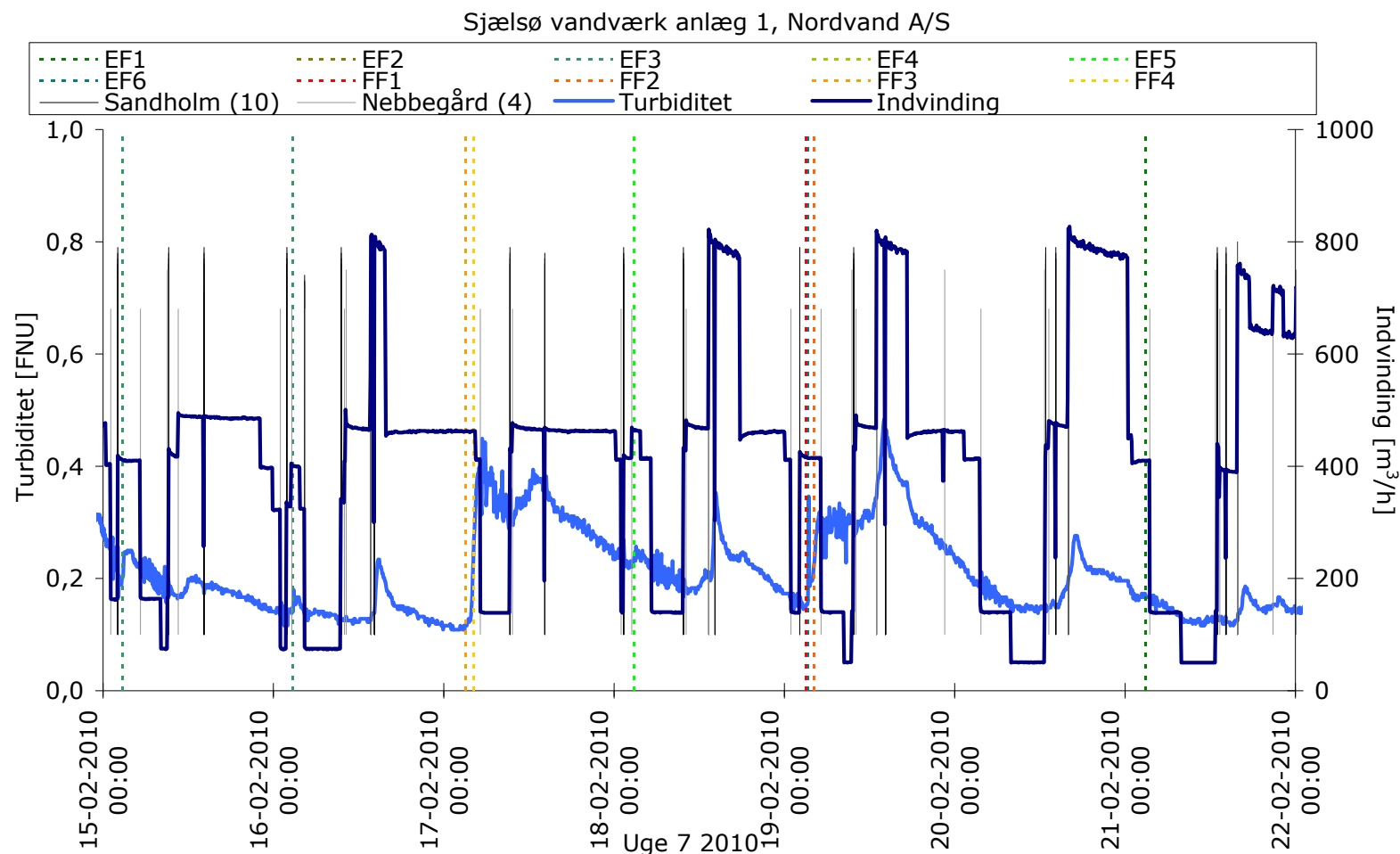




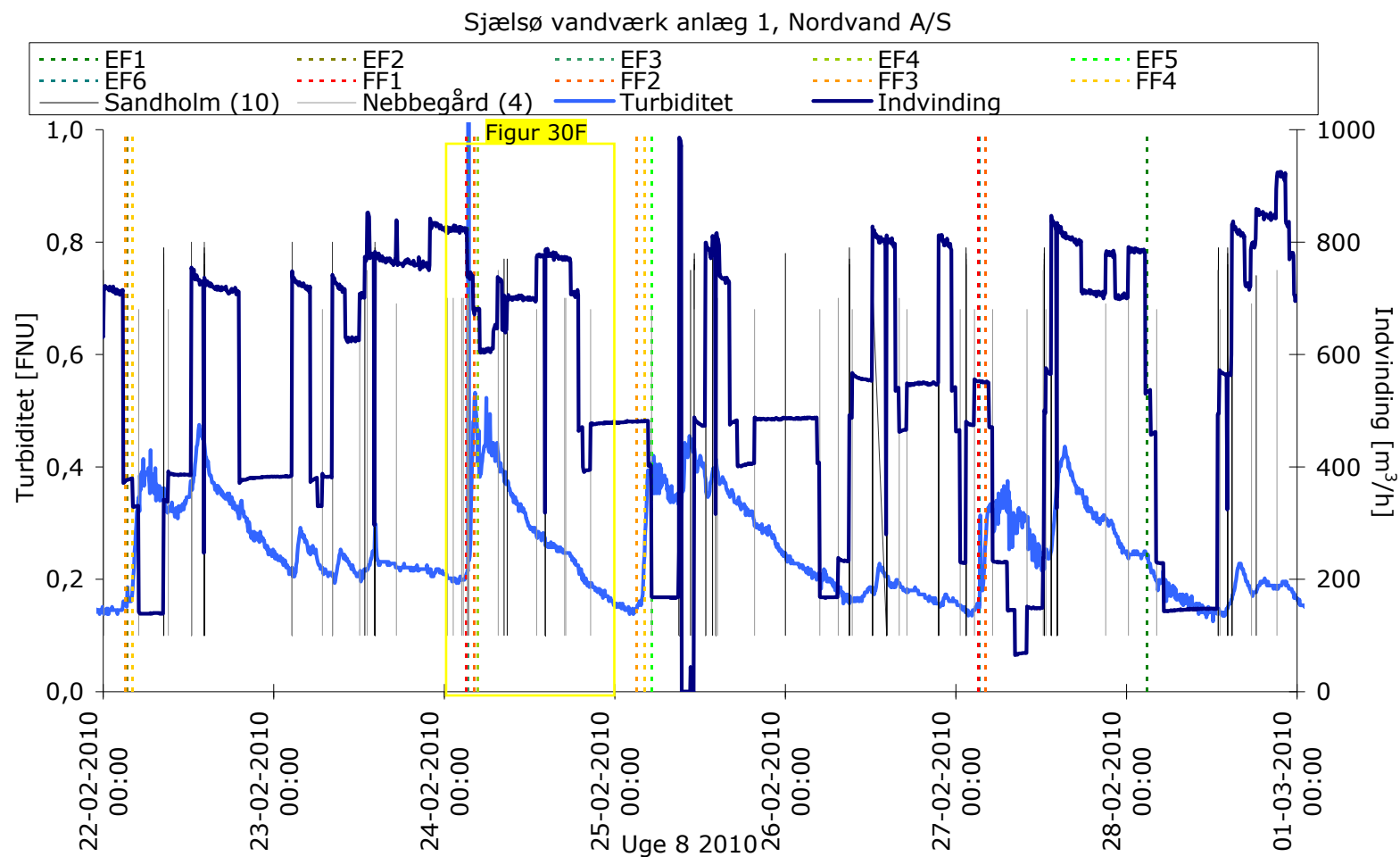
Figur 36: Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 1, Nordvand A/S for uge 5 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Sandholm og Nebbegård angiver boringsopstart af boring på de respektive kildepladser, taL i () angiver antal af boringer på pågældende kildeplads.



Figur 37: Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 1, Nordvand A/S for uge 6 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Sandholm og Nebbegård angiver borningsopstart af boring på de respektive kildepladser, taL i () angiver antal af boringer på pågældende kildeplads.



Figur 38: Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 1, Nordvand A/S for uge 7 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Sandholm og Nebbegård angiver boringsopstart af boring på de respektive kildepladser, taL i () angiver antal af boringer på pågældende kildeplads.

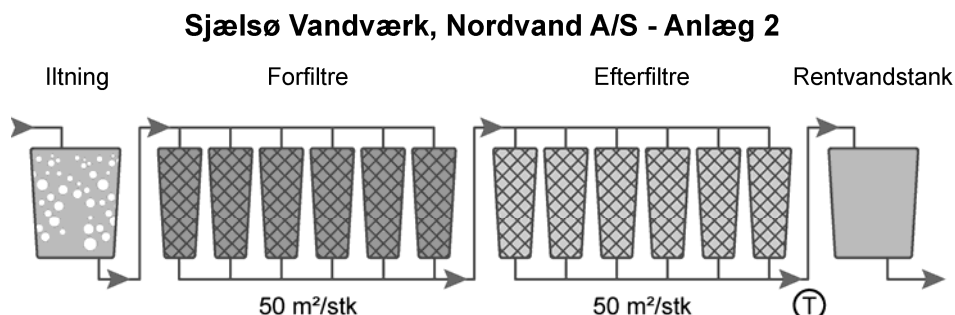


Figur 39: Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 1, Nordvand A/S for uge 8 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Sandholm og Nebbegård angiver boreringsopstart af boring på de respektive kildepladser, taL i () angiver antal af boreriger på pågældende kildeplads.

### 3.4.2 Anlæg 2

Anlæg 2 modtager vand fra 6 kildepladser med i alt 35 borer: Rungsted kildeplads (5 borer – ydelser på borer mellem 16-27 m<sup>3</sup>/h), Opnæsgård kildeplads (3 borer), Nivå kildeplads (6 borer), Mortenstrup kildeplads (7 borer – ydelser på borer mellem 10-86 m<sup>3</sup>/h), Langstrup kildeplads (10 borer) og Ullerød kildeplads (4 borer) med gennemsnitligt ca. 40% af råvandsindvindingen fra Langstrup kildeplads og ca. 60% fordelt omtrent ligeligt fra de øvrige kildepladser. En del af borerne ved Langstrup kildeplads og Nivå kildeplads indeholder store mængde methan, hvorfor vandet først gennemgår en kraftig luftning i inkalufte. Vandet passerer 5 parallelle reaktionstanke, før det ledes til 6 forfiltre (hver 50 m<sup>2</sup>) efterfulgt af 6 efterfiltre (hver 50 m<sup>2</sup>), før vandet ledes til rentvandstanken (Figur 40). Anlægget kører kontinuert med kun 2x5 filtre i drift, da filtrene i rotation tages ud af drift og ligger stille to og to (forfilter 1 samtidig med efterfilter 1 osv.) en uge efterfulgt af returskyl (rotationscyklus på 6 uger).

Forfiltrene returskylles enkeltvis når 14.500 m<sup>3</sup> har passeret det enkelte filter (i snit hver 5.-8. dag). Filtret returskylles over 18 minutter (5 min sænkning, 3 min vand+luft, 5 min vand, 3 min vand+luft, 2 min vand), hvorefter det ligger stille 50 min før opstart. Efterfiltrene returskylles enkeltvis, når 20.000 m<sup>3</sup> vand har passeret det enkelte filter (i snit hver 8.-11. dag). Filtret returskylles over 18 minutter (5 min sænkning, 5 min luft, 8 min vand), hvorefter det ligger stille 30 minutter inden opstart. De filtre, der tages ud af drift ugevis og derefter returskylles, følger en fast rotation uafhængig af passeret vandvolumen.



Figur 40: Skitse af vandbehandlingen på Sjælsø Vandværk anlæg2, Nordvand A/S med angivelse af sensorplacering.

Turbiditetsmålinger er sammenholdt med driftsdata for januar og februar måned 2010 baseret på 5 min-værdier (Figur 45 - Figur 52).

#### Indvindingsflow:

Variationer i indvindingen medførte 2363 boringsaktiveringer i perioden, hvor indvindingen over døgnet var lavest i morgentimerne (0-160 m<sup>3</sup>/h) og højst i dagtimerne og over natten (maksimal indvinding 700-800 m<sup>3</sup>/h).

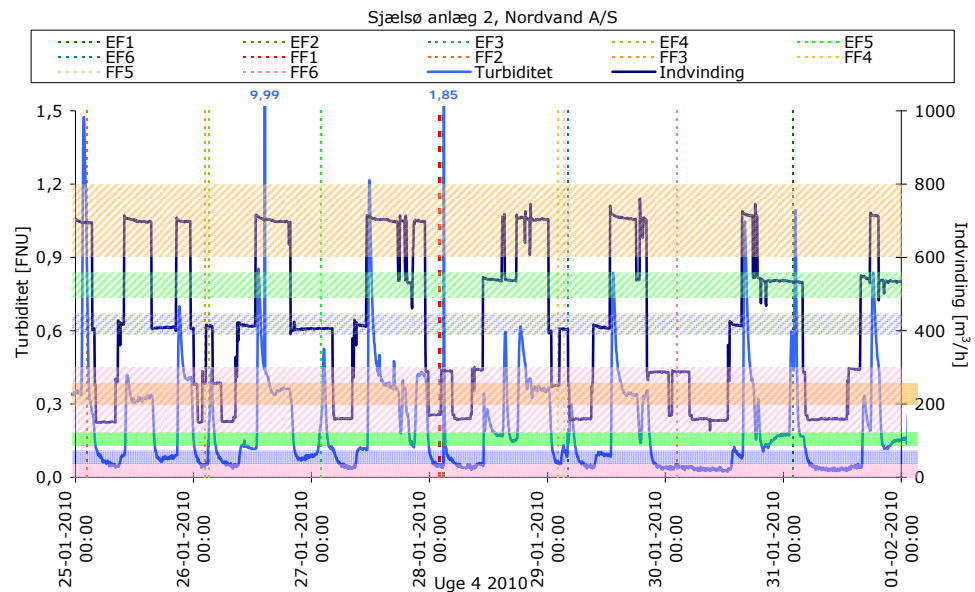
#### Turbiditet:

Turbiditeten var stærkt afhængig af flowet, og der kunne knyttes et stabilt baseline-niveau til et givent flow-niveau. Når indvindingsflowet blev øget, steg turbiditeten øjeblikkeligt kraftigt og aftog derefter henover 2-4 timer til det nye flows baseline-niveau indtil næste flowændring. En flow-nedjustering sænkede turbiditeten til det pågældende flows baseline-niveau. Generelt betragtet gav flowniveauer på:

- 160-300 m<sup>3</sup>/h et baseline-niveau på 0,02-0,05 FNU
- 400-450 m<sup>3</sup>/h en top i turbiditet på 0,1-0,15 FNU og et baseline-niveau på 0,1 FNU
- 500-550 m<sup>3</sup>/h en top på 0,3-0,9 FNU og et baseline-niveau på 0,2 FNU
- 600 m<sup>3</sup>/h eller derover en top på 0,9-2,7 FNU med et baseline-niveau på 0,3-0,4 FNU

(jævnfør eksempel i Figur 41).

Ved at køre anlæg 2 med et mere konstant indvindingsflow, vil de større udsving i turbiditeten formentlig kunne undgås og et mere stabilt turbiditetsniveau opretholdes.

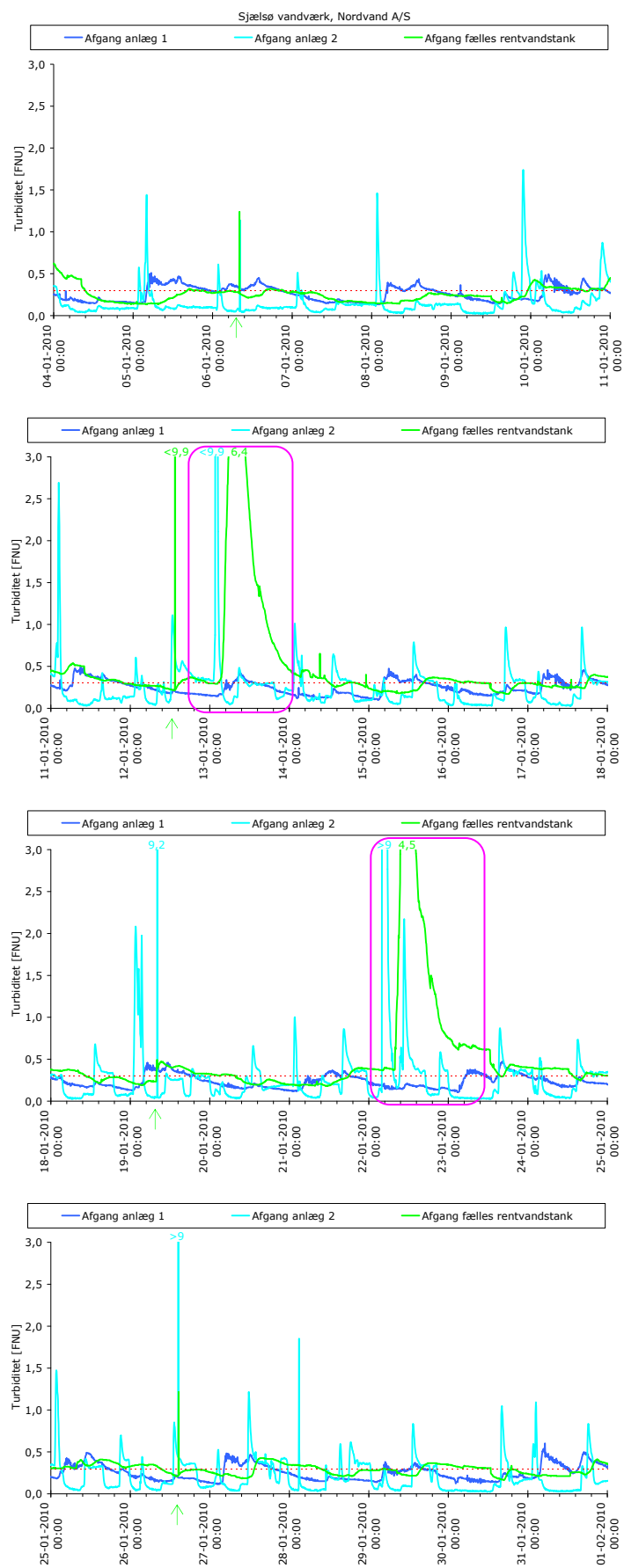


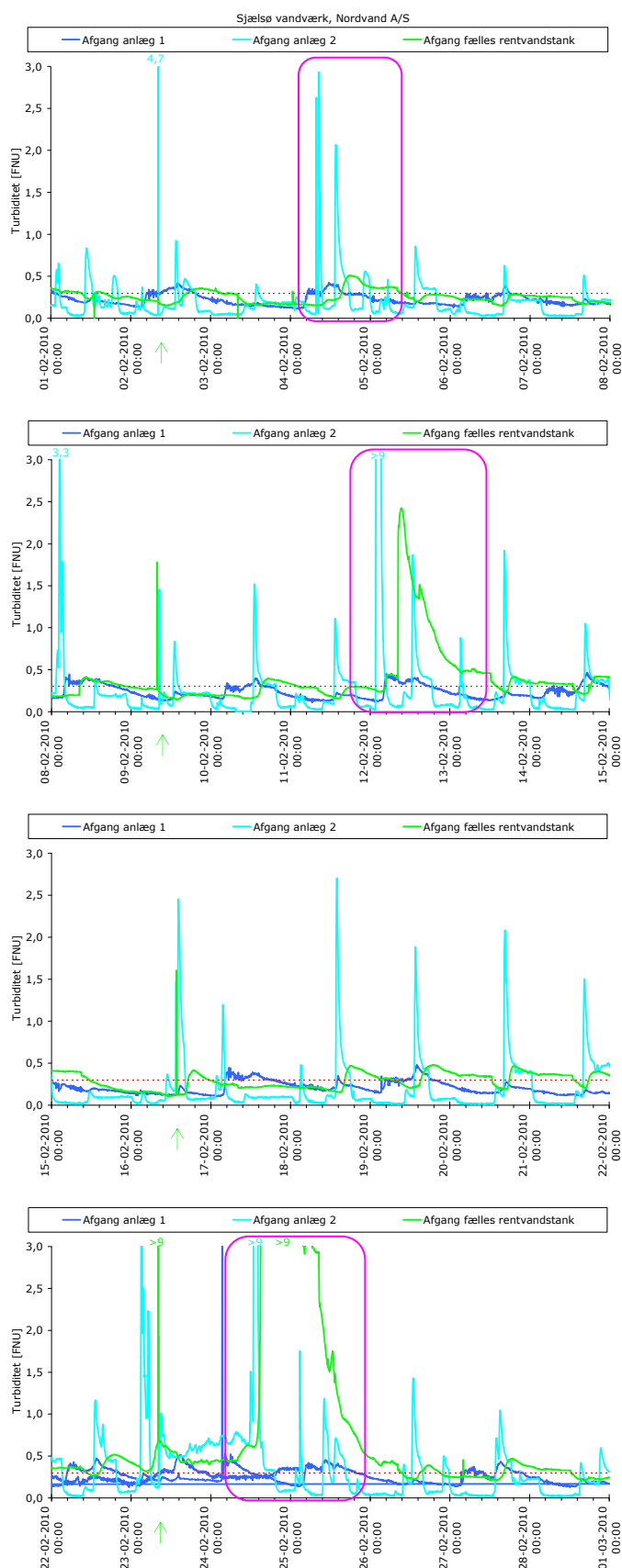
Figur 41: Eksempel på sammenhæng imellem flow-niveau( skraveret markering) og baseline-niveau (fuld markering), Sjølsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 4 2010 (modsvarende Figur 48). Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier, EF /FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #.

Onsdag 6. januar 2010 og hver af de efterfølgende tirsdage blev set et lodret udslag på en enkelt 5-min værdi på turbiditeten, hvorefter kurveforløbet fortsatte uændret (markeret med grønne pile på Figur 45 - Figur 52). Disse udslag skyldtes manuel rensning af turbiditetssensoren, hvor sensoren kortvarig blev frakoblet.

Boringerne på kildepladserne havde nogenlunde samme niveauer af NVOC (2,2 – 3,9 mg/L og mangan (0,03-0,16 mg/L), mens jernniveauet generelt var lavere (0,02-1,4 mg/L) på Nivå og Ullerød kildeplads samt en enkelt boring fra Mortenstrup kildeplads end fra de øvrige boringer (1,6-3,5 mg/L – og enkelt boring med 8,9 mg/L på Langstrup kildeplads). Da der kontinuert blev indvundet fra et større antal boringer fra flere kildepladser, mindskes indflydelsen af den enkelte boring, og det kan antages, at udfældningen i filtrene var relativt konstant over tid.

Der var ikke en konsekvent påvirkning af turbiditeten ved opstart af filtre efter returskyl. Mest bemærkelsesværdigt var effekten af returskyl af efterfilter 2, der resulterede i kraftige stigninger i turbiditeten (over turbiditetssensorens max logning på 9,9 FNU) over 2-6 timer, der ligeledes kunne genfindes som kraftig langvarig stigning i turbiditeten ved afgang den fælles rentvandstank (turbiditet afgang anlæg 1, anlæg 2 og afgang fælles rentvandstank i Figur 42).



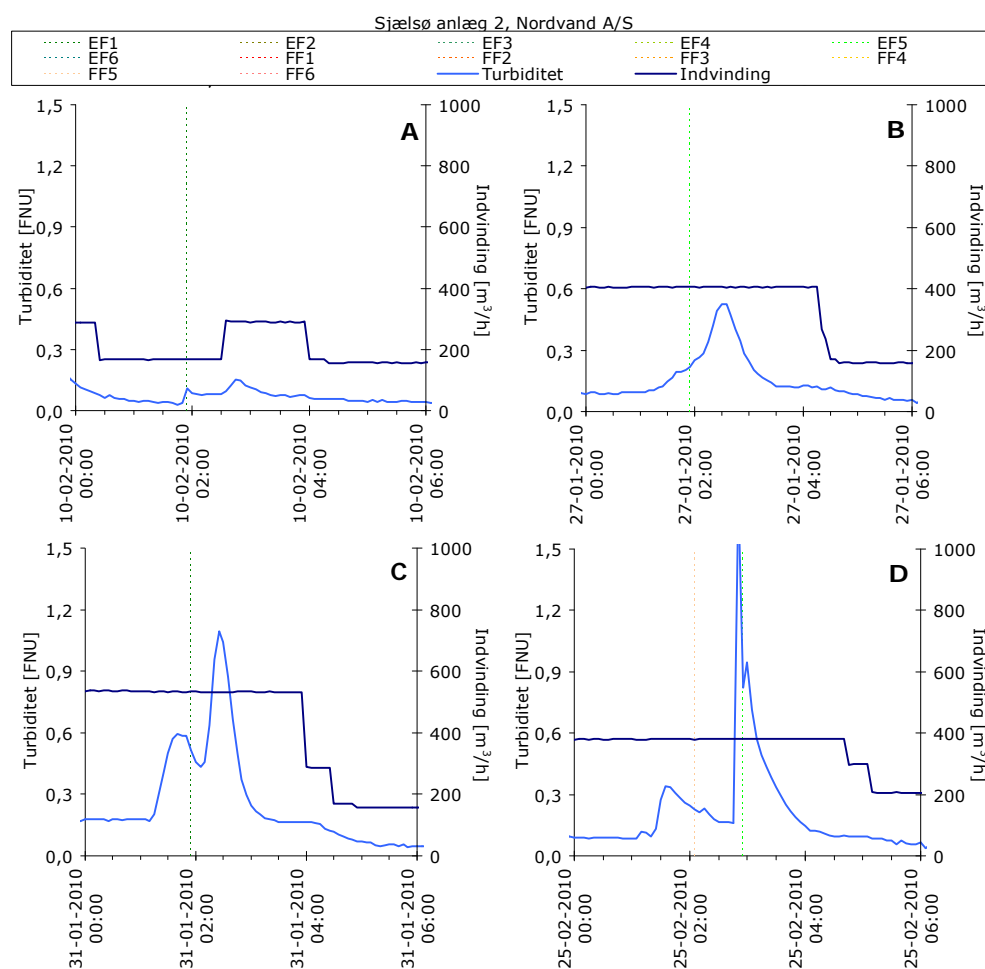


Figur 42: Turbiditetsmålinger ved afgang anlæg 1, afgang anlæg 2 og afgang fælles rentvandstank som 5-min værdier for uge 1-8 2010, Sjælsø vandværk anlæg 2, Nordvand A/S. Pink markering angiver top i turbiditet ved afgang anlæg 2, som genfindes ved afgang fra den fælles rentvandstank, forårsaget af en defekt ventil på efterfilter 2 under returskyl. Grønne pile angiver lodrette udslag i turbiditetssignalet forårsaget af manuel rensning af sensoren. Stiplet rød linje angiver kvalitetsværdien ved afgang værk på 0,3 FNU.



Disse stigninger startede samtidigt med start af returskyllet og skyldes, at ventilen, der lukker af for filtret under returskyl, var defekt, så en del af det urene returskyllevand mere eller mindre direkte gik med i produktionen. Sjælsø Vandværk har planlagt udskiftning af alle filterventiler på anlæg 2, for at undgå kvalitetsproblemer forårsaget af defekte ventiler, der ikke lukker fuldstændigt under returskyl.

Der var ikke en entydig påvirkning af turbiditeten ved returskyl. Turbiditeten målt efter efterfiltrene ændres næsten ikke når et efterfilter blev startet op efter returskyl under et lavt ( $\leq 350 \text{ m}^3/\text{h}$ ) indvindingsflow (eksempel i Figur 43A). Ved returskyl af efterfiltre under højere indvindingsflow, var der ofte stigning eller toppe i turbiditeten ved returskyllets start, hvilket formentlig skal tilskrives en øget belastning af de øvrige filtre evt. i kombination med defekt ventil på filtret under returskyl, og der kom toppe i turbiditeten ved opstart af filtrene efter returskyl (op til 1,5 FNU – eksempler fra Figur 45 - Figur 52 er fremhævet i Figur 43B-D).

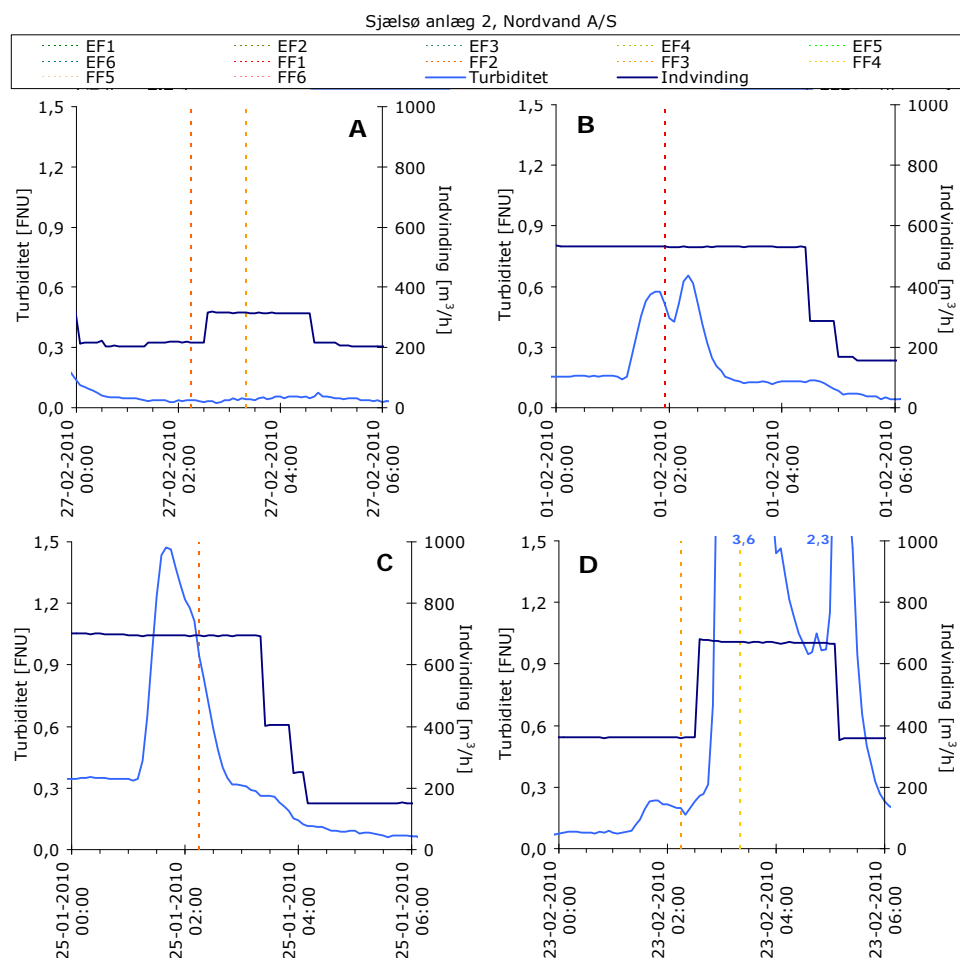


Figur 43: Eksempler på turbiditetsprofiler som 5-min værdier målt efter efterfiltrene ved opstart af efterfiltre efter returskyl under forskellige indvindingsflow (udsnit af A: Figur 50, B: Figur 48, C: Figur 48, D: Figur 52), Sjælsø vandværk anlæg 2, Nordvand A/S. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr.

Det samme mønster blev set ved returskyl af forfiltrene. Ved returskyl under et lavt indvindingsflow var der ingen eller kun lille effekt (stigning på 0,05-0,1 FNU) på turbiditeten målt efter efterfiltrene (eksempel fremhævet i Figur 44A). Generelt gav returskyl af forfiltre anledning til en top i turbiditeten målt efter efterfiltret ved returskyllets start, formentlig forårsaget af en øget

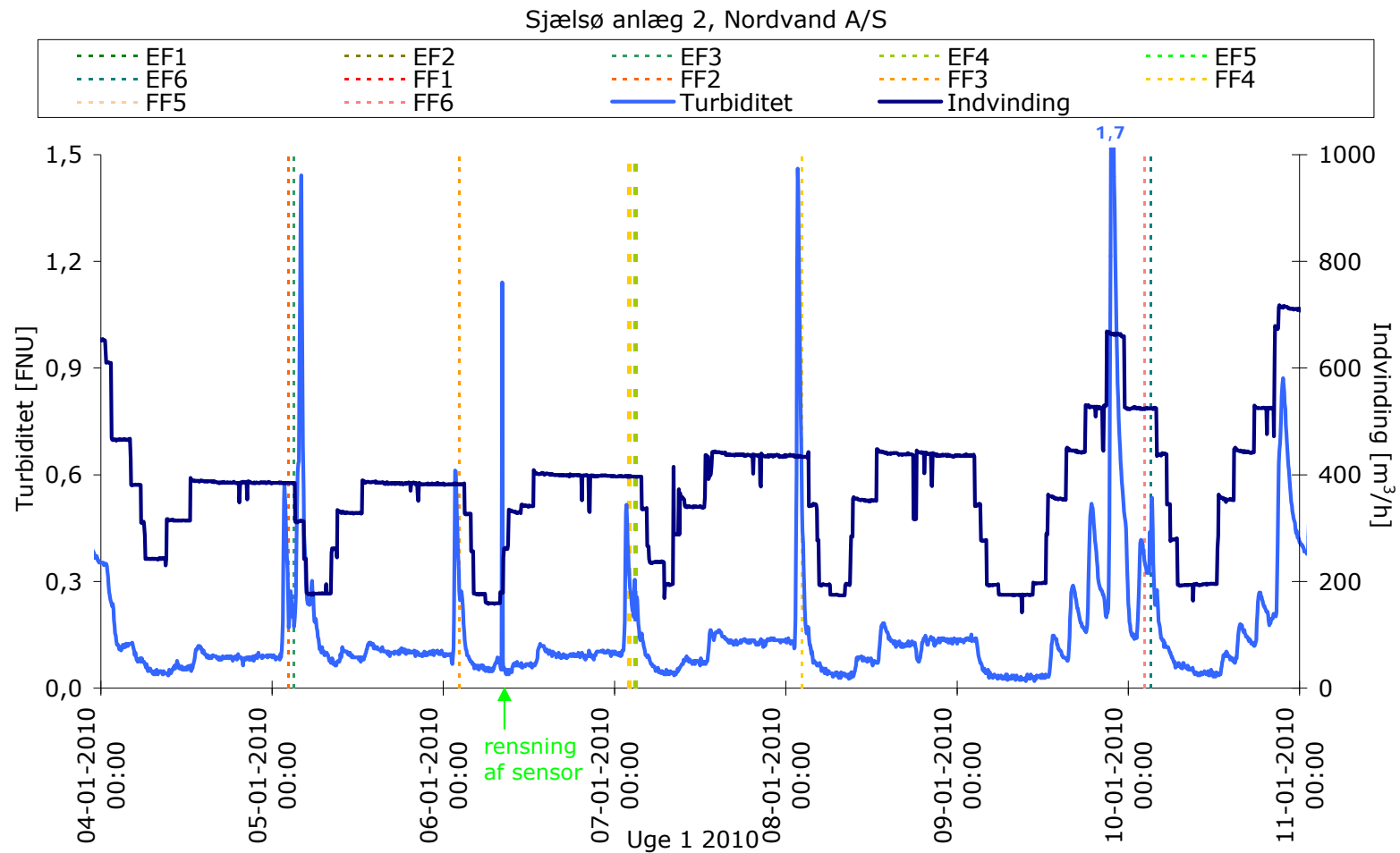
belastning af de øvrige filtre evt. i kombination med defekt ventil på filtret under returskyl. Specielt ved returskyl af forfilter 4 d. 23/2-2010 var det sandsynligvis en defekt ventil, der forårsagede en kraftig top i turbiditeten (op til 3,6 FNU over 3 timer) hen over returskyllet (Figur 44D), der efterfølgende kunne genfindes ved afgang fra den fælles rentvandstank (Figur 42).

Turbiditeten ved opstart af filtre efter returskyl blev ikke påvirket af om filtret forinden havde været i produktion eller ude af drift en uge.

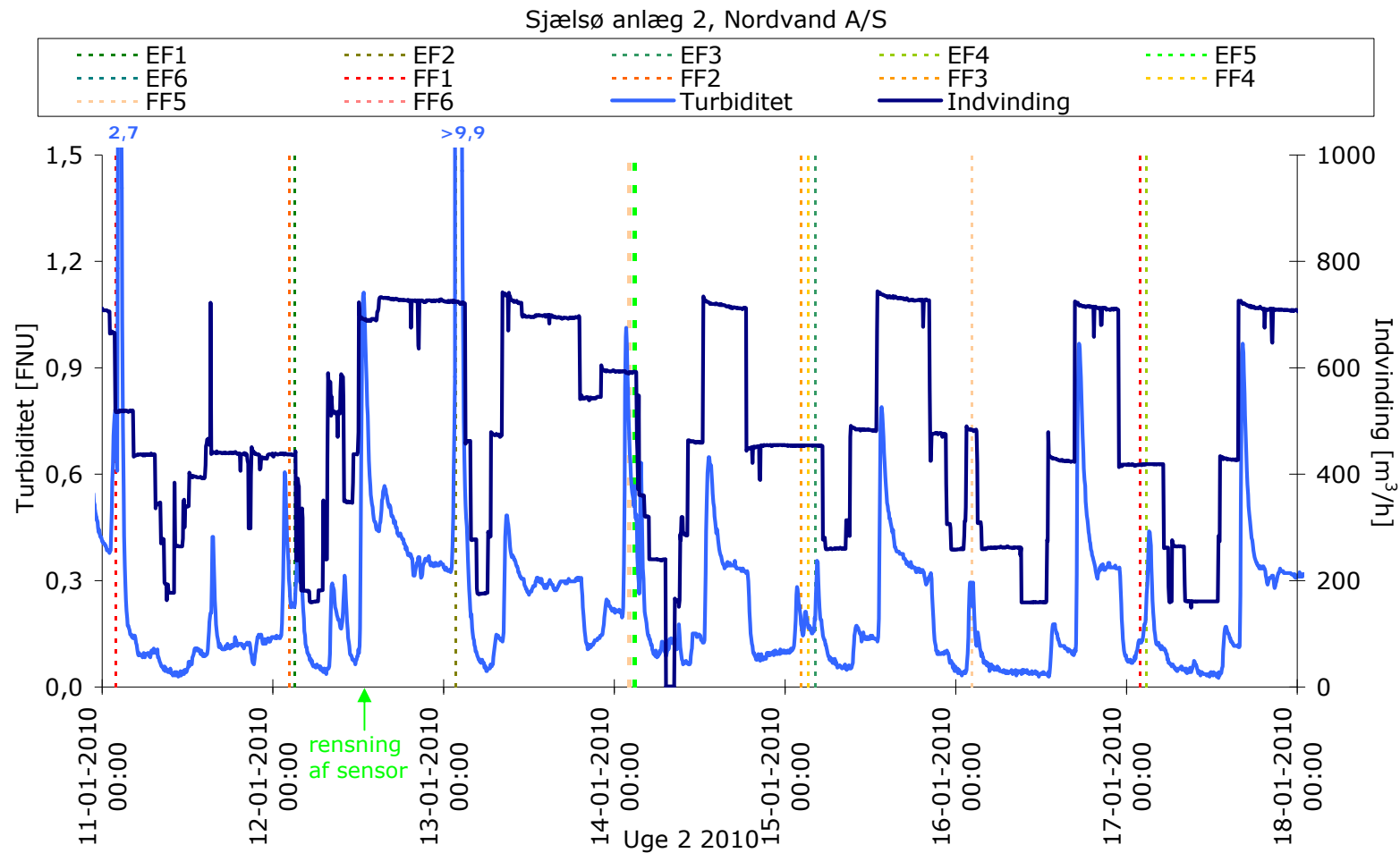


Figur 44: Eksempler på turbiditetsprofiler som 5-min værdier målt efter efterfiltrene ved opstart af forfiltre efter returskyl under forskellige indvindingsflow (udsnit af A: Figur 52, B: Figur 49, C: Figur 48, D: Figur 52), Sjælsø vandværk anlæg 2, Nordvand A/S. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #.

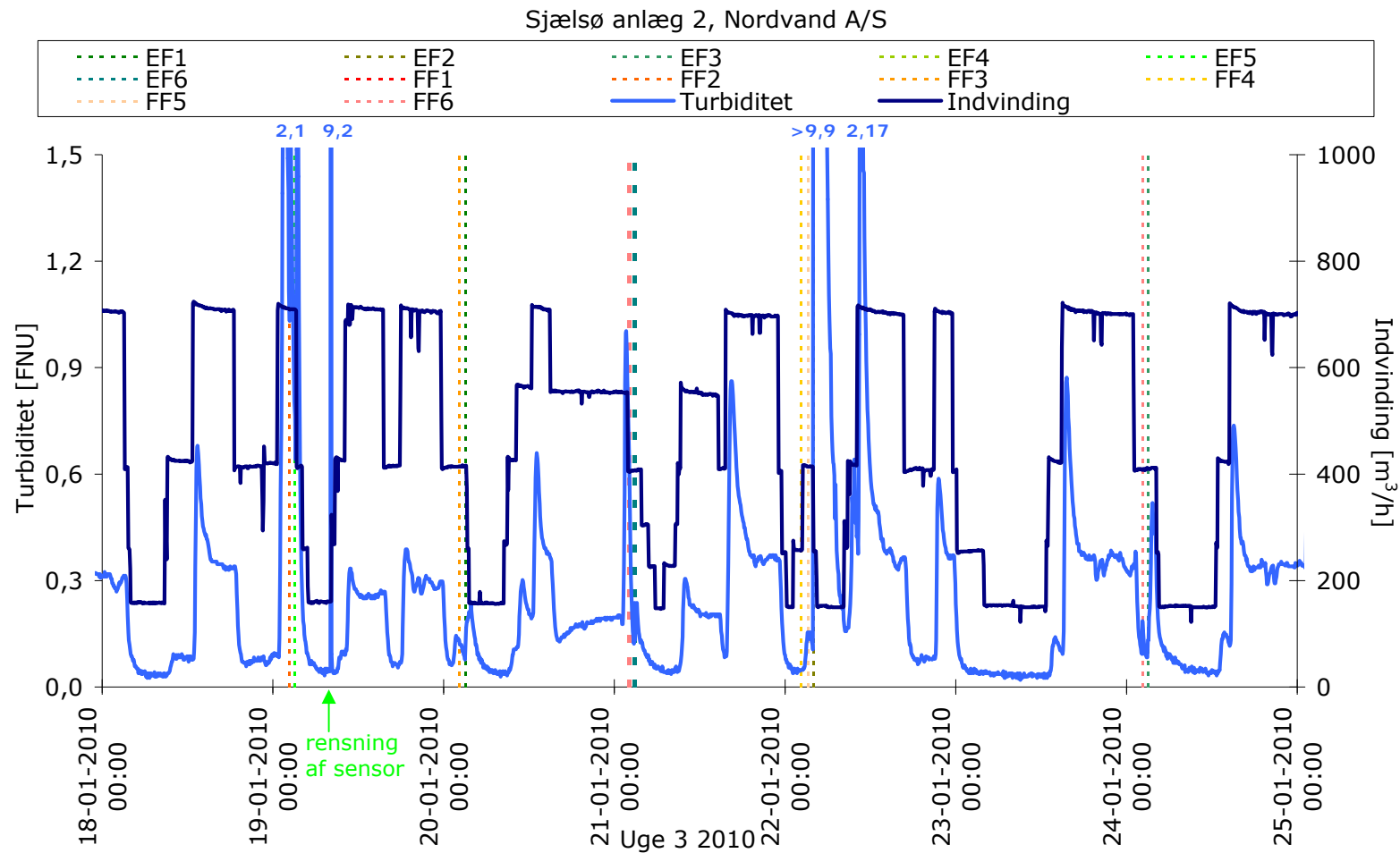
Ved afgang værk blev kvalitetsværdien på 0,3 FNU var overskredet i en stor del af perioden, i perioder endda med værdier op til 4,5 FNU. Større overskridelser ved afgang værk skyldtes defekte ventiler under returskyl på anlæg 2, mens mindre overskridelser skyldes, at afgang fra anlæg 1 havde relativ høje gennemsnitsniveauer med værdier imellem 0,2-0,6 FNU i størstedelen af perioden. For at forbedre vandkvaliteten har Sjælsø vandværk planlagt at ombygge anlæg 1 og udskifte ventiler på anlæg 2 i 2010-2011.



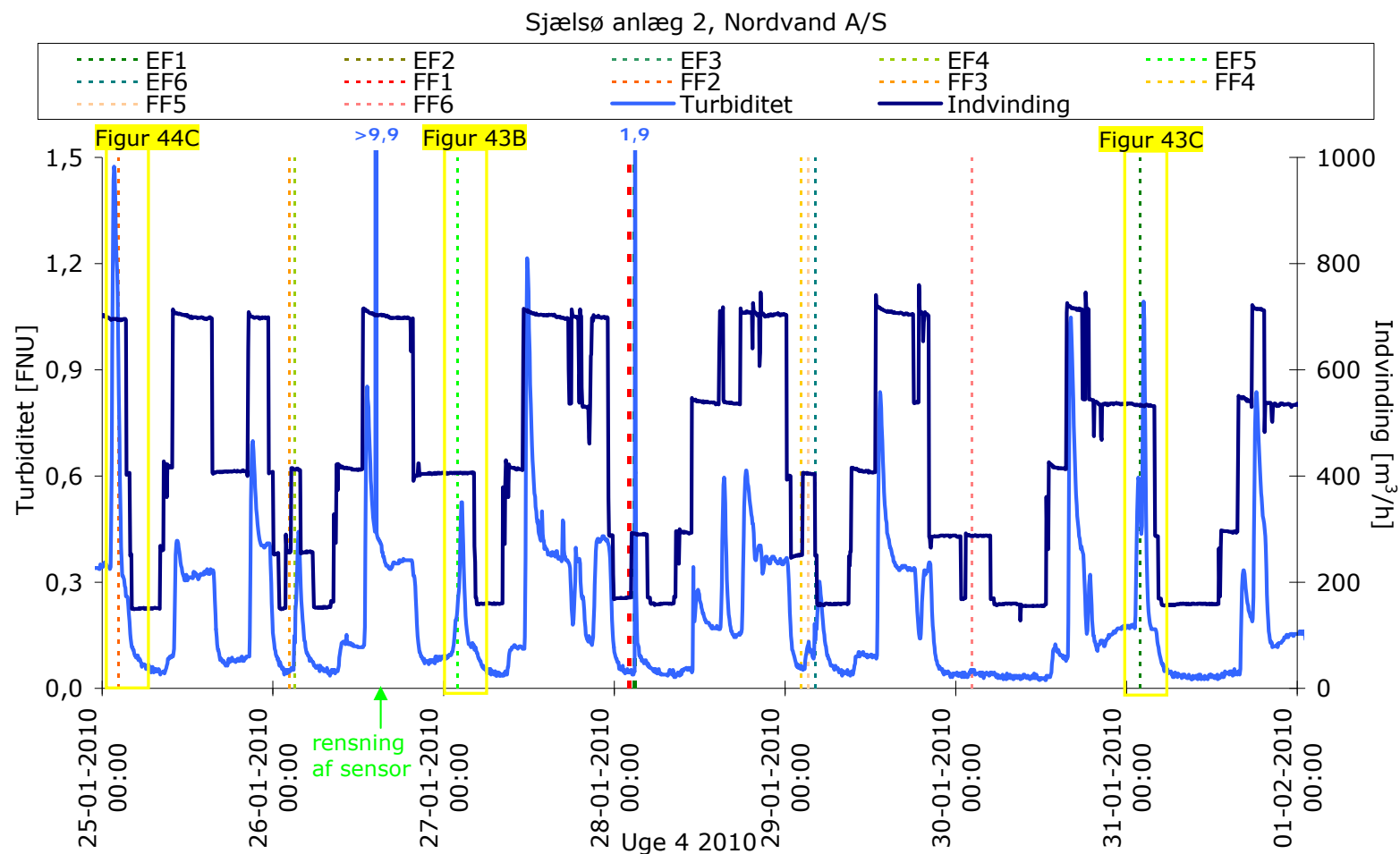
Figur 45: Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 1 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Fremhævet opstart angiver returskyl af filtret efter 1 uge ude af drift. Turbiditetssensor placeret efter efterfiltrene. Se Bilag A for tilsvarende figur med boringsopstart indført.



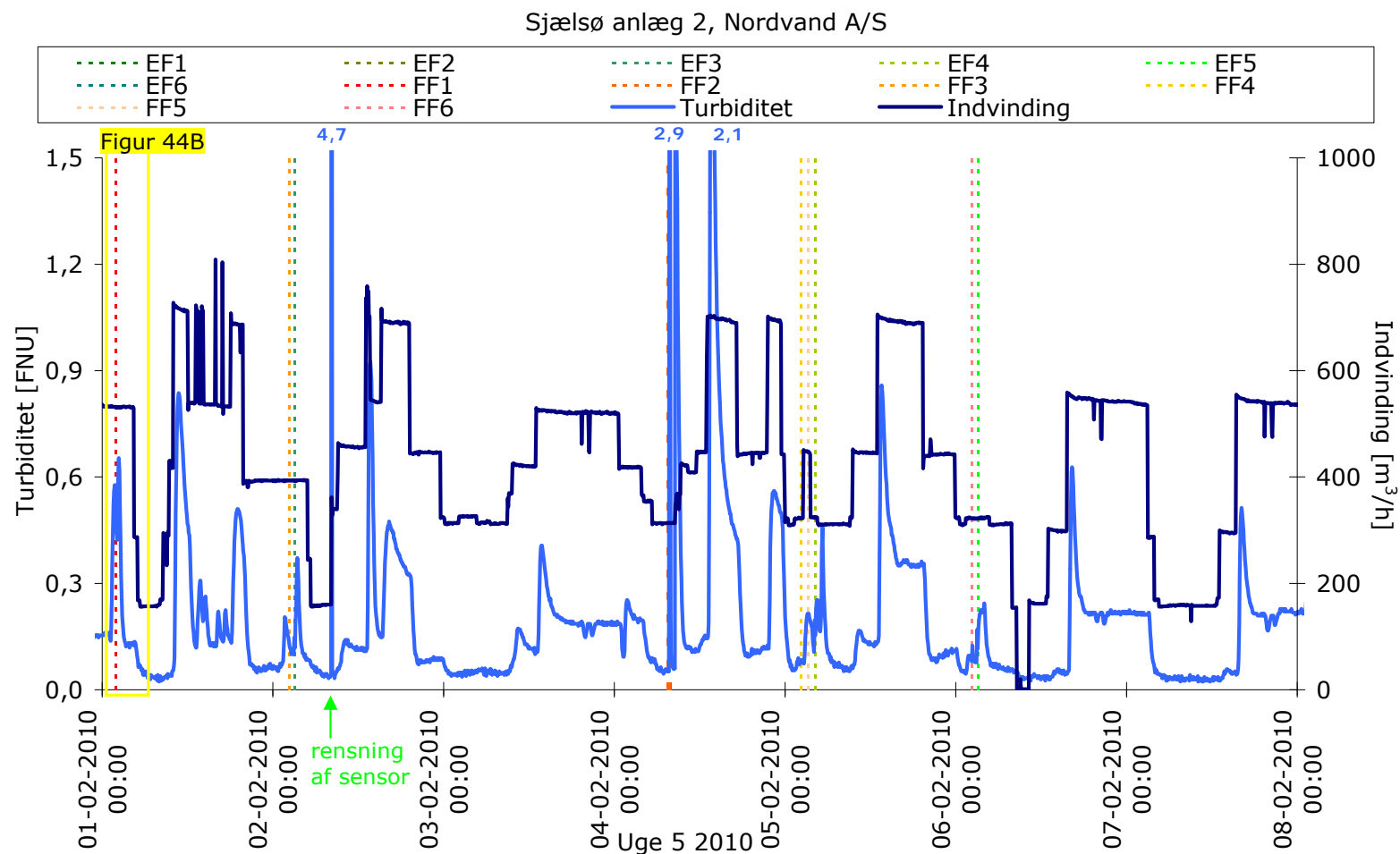
Figur 46: Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 2 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Fremhævet opstart angiver returskyl af filtret efter 1 uge ude af drift. Turbiditetssensor placeret efter efterfiltrene. Se Bilag A for tilsvarende figur med boringsopstart indført.



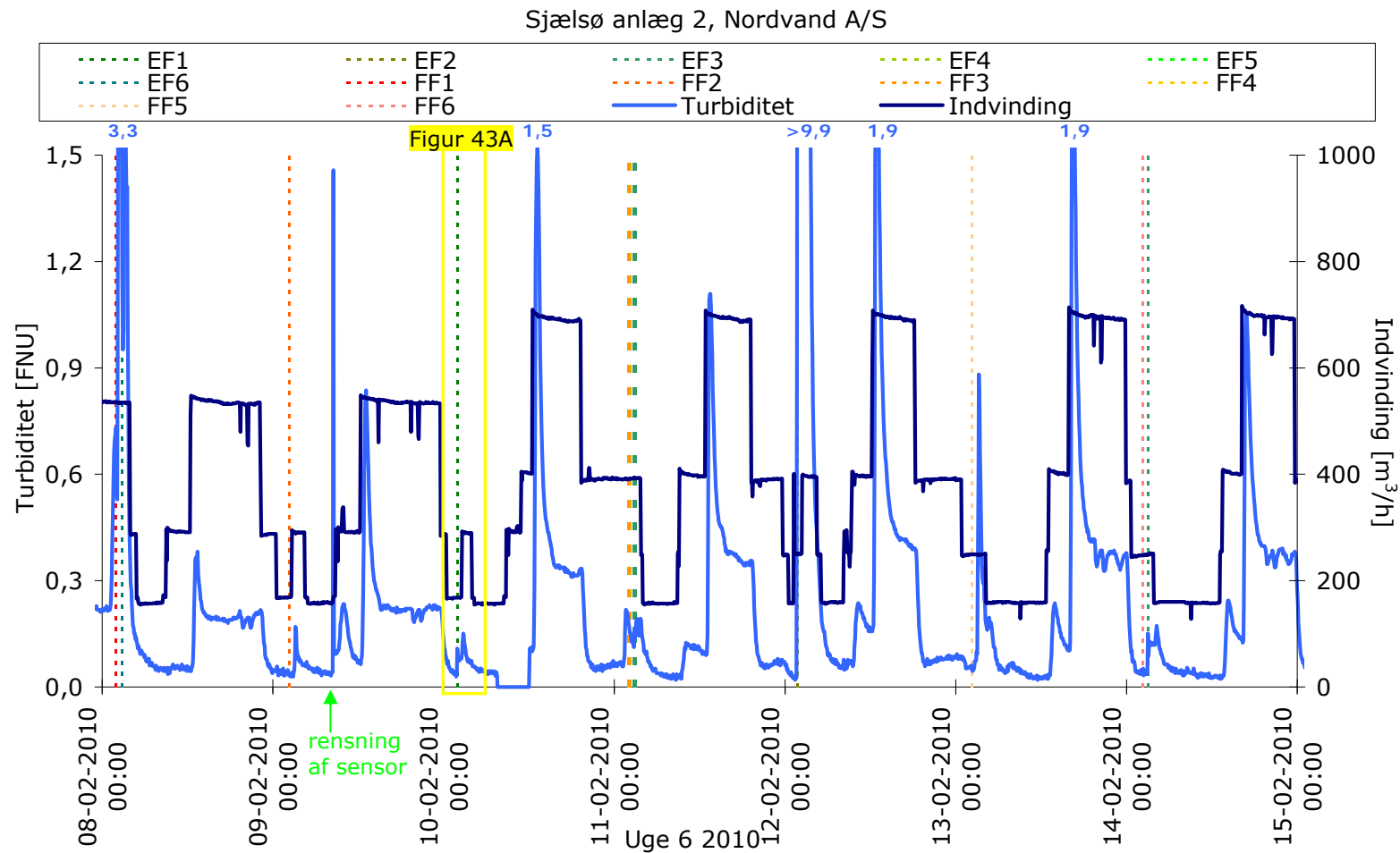
Figur 47: Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 3 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Fremhævet opstart angiver returskyl af filtret efter 1 uge ude af drift. Turbiditetssensor placeret efter efterfiltrene. Se Bilag A for tilsvarende figur med boringsopstart indført.



Figur 48: Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 4 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Fremhævet opstart angiver returskyl af filtret efter 1 uge ude af drift. Turbiditetssensor placeret efter efterfiltrene. Se Bilag A for tilsvarende figur med boringsopstart indført.

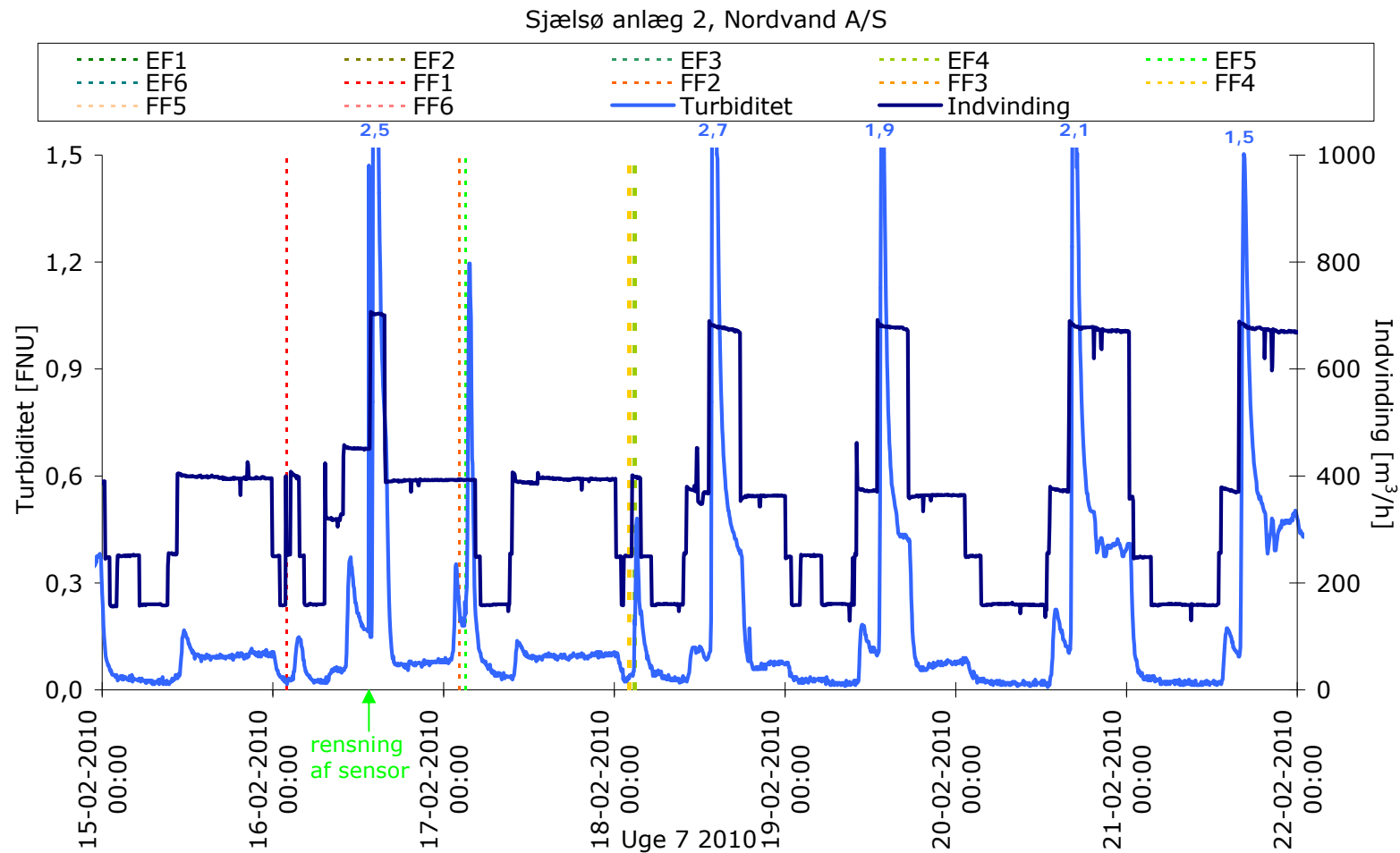


Figur 49: Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 5 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Fremhævet opstart angiver returskyl af filtret efter 1 uge ude af drift. Turbiditetssensor placeret efter efterfiltrene. Se Bilag A for tilsvarende figur med boringsopstart indført.

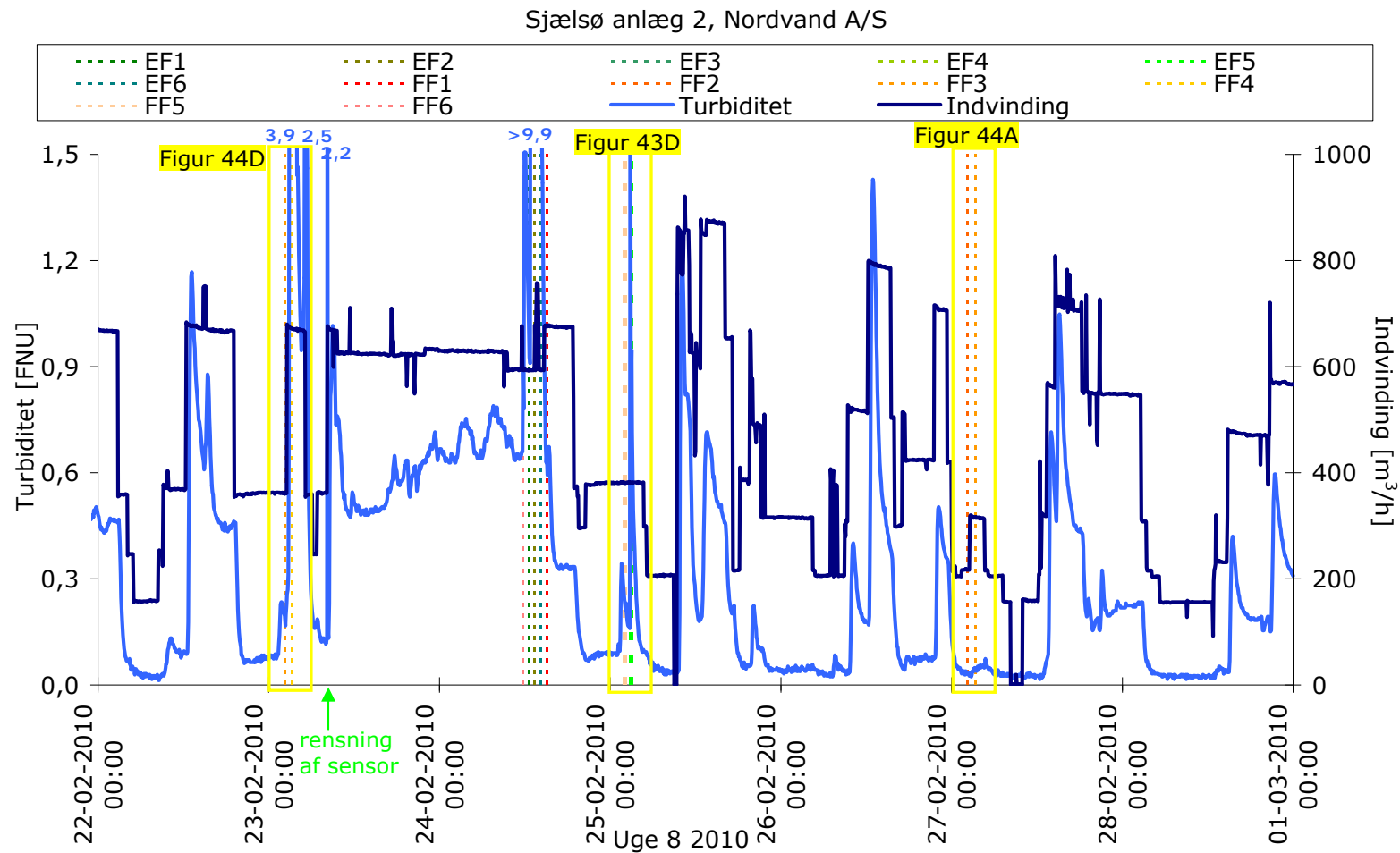


Figur 50 Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 6 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Fremhævet opstart angiver returskyl af filtret efter 1 uge ude af drift. Turbiditetssensor placeret efter efterfiltrene. Se Bilag A for tilsvarende figur med boringsopstart indført.





Figur 51: Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 7 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Fremhævet opstart angiver returskyl af filtret efter 1 uge ude af drift. Turbiditetssensor placeret efter efterfiltrene. Se Bilag A for tilsvarende figur med boringsopstart indført.



Figur 52: Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 8 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Fremhævet opstart angiver returskyl af filtret efter 1 uge ude af drift. Turbiditetssensor placeret efter efterfiltrene. Se Bilag A for tilsvarende figur med boringsopstart indført

### 3.5 Diskussion af sensortidsserier fra vandværker

Alle fem anlæg havde turbiditetssensorer placeret efter filtrene. På Åboværket, Århus Vand A/S og på Dalumværket, VandCenter Syd A/S var turbiditetssensoren placeret efter fælles filterafgang fra enkelt filtersæt. På Vognsbøl vandværk, Esbjerg Forsyning A/S og Sjælsø vandværk (anlæg 1 og 2), Nordvand A/S var sensorerne derimod placeret efter fælles afgang fra efterfiltrene, så effekter af efterfiltrene blev monitoreret direkte, mens effekter fra forfiltrene først blev monitoreret efter vandet havde passeret efterfiltrene, der også kan have påvirket vandkvaliteten.

På Vognsbøl vandværk og Sjælsø vandværk var der desuden monteret turbiditetssensorer ved afgang rentvandstank. På trods af, at turbiditetstoppe forårsaget af filtrene til dels blev udjævnet ved opblanding i rentvandstanken, kunne toppene forsat registreres af sensorene ved afgang værk.

For alle anlæg var der et tydeligt baseline-niveau for turbiditeten. Opstart af filtre efter returskyl samt øget af belastningen af filtrene (øget indvindingsflow) forårsagede afvigelser fra baseline-niveauet. Imellem anlæggene var der stor forskel på, hvor stor en del af tiden dette baseline-niveau blev fastholdt, og hvor meget opstart af filtre efter returskyl og øget belastning af filtrene påvirkede turbiditeten (jævnfør Tabel 10 og Figur 53). De højeste turbiditetstoppe som følge af opstart efter returskyl af filtre blev set på Vognsbøl vandværk og Åboværket med toppe op til 4,8 og 3,6 FNU, mens de laveste toppe blev set på Sjælsø vandværk (bortset fra toppe forårsaget af defekte filterventiler).

Tabel 10: Sammenfatning af baseline-niveauer for turbiditeten og effekter af opstart af filtre efter returskyl og øget filterbelastning. Turbiditetssensor placeret efter enkelt filtersæt på Åboværket, Århus Vand A/S og på Dalumværket, VandCenter Syd A/S, efter efterfiltre på Vognsbøl vandværk, Esbjerg Forsyning A/S og på Sjælsø vandværk A/S (anlæg 1 og 2).

	Baseline-niveau	Effekt af opstart af filtre efter returskyl		Effekt af øget filterbelastning (øget flow)		Efter filtre
	[FNU]	Højde af top [FNU]	Varighed før top aftaget til 0,3 FNU [timer]	Højde af top over øvrige niveau [FNU]	Varighed af top [timer]	% af værdier >0,3 FNU
Vognsbøl	0,15-0,20	3,0-4,8	6-8	1,0-1,4	2-3	13 <sup>#</sup>
Åboværket	0,15-0,20	1,6-3,6	24	0,04-0,65	2-3	42
Dalumværket	0,06-0,15	0,6-1,6	¾	0,25-0,60	1/6-1/3	2
Sjælsø, anlæg 1	0,11-0,20	0,4-0,5	15-20	0,04-0,1	3	26 <sup>^</sup>
Sjælsø, anlæg 2	0,04-0,10*	0-1,5 <sup>+</sup>	2	0,9-2,7	2-4	25 <sup>^</sup>

\*afhængig af flow, da der kunne fastlægges stabilniveau for forskellige flow, jævnfør afsnit 3.4.2.

<sup>+</sup> Fra enkelte filtre optrådte langt højere toppe forårsaget af defekte filter ventiler, jævnfør afsnit 3.4.2.

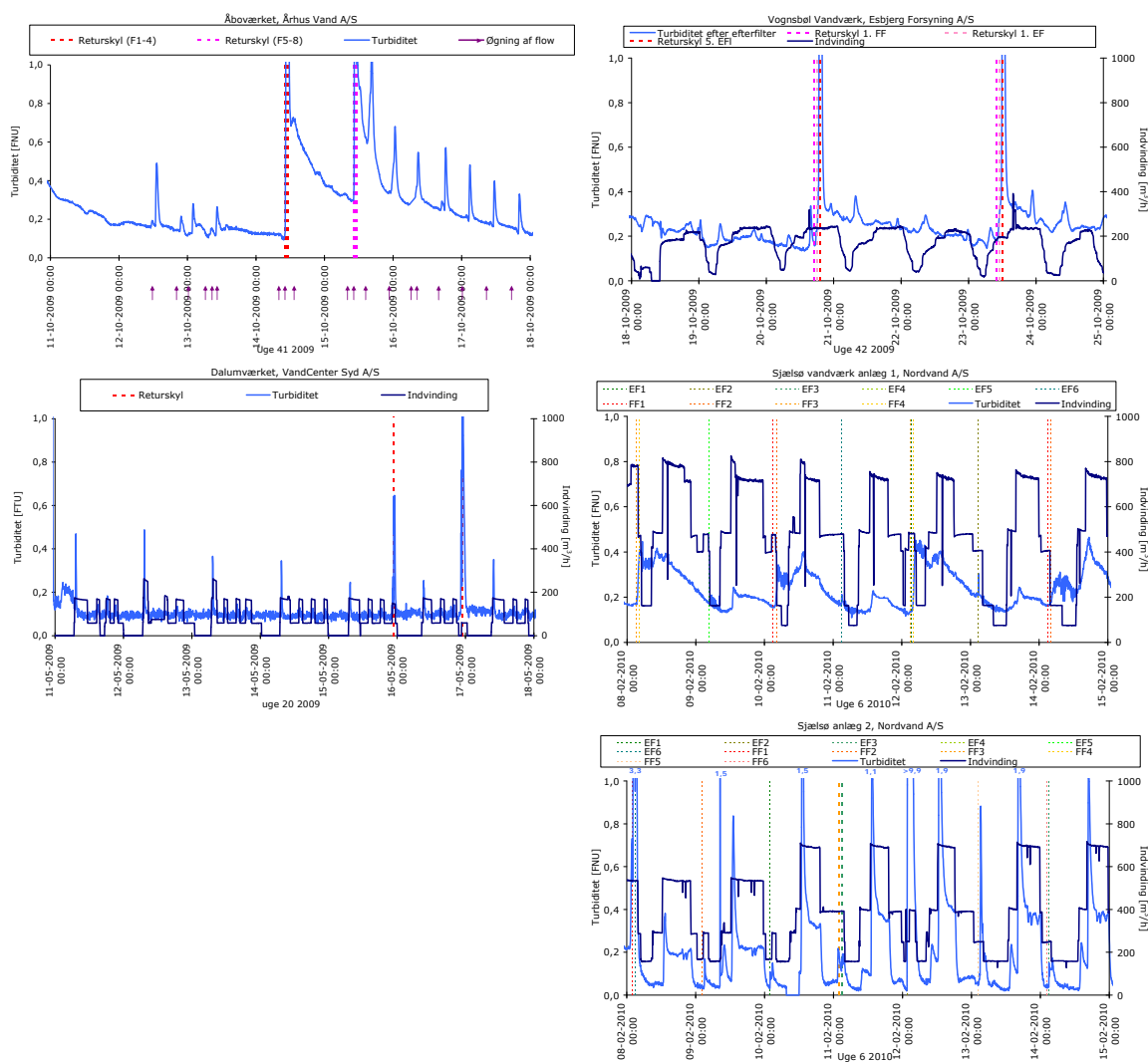
<sup>#</sup> 17% ved afgang værk

<sup>^</sup> 49% ved afgang fælles rentvandstank anlæg 1 og anlæg 2.

Varigheden af en turbiditetstop ved opstart efter returskyl varierede imellem værkerne (¾-24 timer). Der var ligeledes stor forskel på effekten af øget filterbelastning (øget indvindingsflow) på turbiditeten med laveste påvirkning på 0,4-0,65 FNU over øvrige niveau (Dalumværket) til 2,7 FNU (anlæg 2, Sjælsø vandværk). Dette skal ses i sammenhæng med at indvindingsflowet var 4-5 gange større på Sjælsø vandværk end på Dalumværket. Ved øget belastning blev turbiditeten påvirket fra 10 min på Dalumværket til 4 timer på

anlæg 2, Sjælsø vandværk. Variationerne mellem værkerne på hvordan turbiditeten blev påvirket af returskyl og flowændringer betød ligeledes stor forskel på, hvor længe turbiditeten var forhøjet i forhold til det enkelte anlægs baseline-niveau. Baseret på 5-min værdier fra tidsserierne i afsnit 3.1-3.4 (uden hensyn til indvindingsflowet) var turbiditeten efter filtrene højere end 0,3 FNU 42% af tiden på Åboværket, men kun 2% af tiden på Dalumværket (Tabel 10).

Bortset fra nogle mindre toppe i turbiditeten på Vognsbøl vandværk kunne der kobles en årsag til alle fravigelser fra baseline-niveauet på alle fem anlæg (selvom forklaringerne ikke nødvendigvis var entydige for anlæg 2, Sjælsø vandværk, jævnfør afsnit 3.4.2). Udslag i turbiditeten som følge af driftsvariationer betyder, at afvigelse forårsaget af andet end normaldrift, sandsynligvis ikke vil blive opdaget, hvis alarmniveauer lægges som højeste og laveste normaldriftsværdi. For at opdage anomalier er det nødvendigt at lægge alarmniveauerne, så de varierer med normaldrift-profilen, så en fastlagt højere værdi accepteres for en fastlagt periode med kendte driftsvariationer (returskyl, øget indvindingsflow). De meget forskellige turbiditetsprofiler for de 5 anlæg (eksempler samlet i Figur 53) viser nødvendigheden af at tilpasse alarmniveauer specifikt til det enkelte anlæg.



Figur 53: Sammenligning af eksempler på Turbiditetsprofil fra efter filtre fra de 5 anlæg omtalt i afsnit 3,1-3,4.

Ved placering af turbiditetsensorer skal det overvejes, hvad man ønsker at monitorere. Placeres sensoren efter rentvandstanken ved afgang værk kontrolleres, hvorvidt kvalitetskravet ved afgang værk overholdes, men informationer om filterdriften og anomalier sløres ved opblandingen i rentvandstanken – hvorved mindre anomalier kan overses. Ved at placere turbiditetssensoren efter filtrene (evt. både efter forfiltre og efterfiltre) opnås i langt højere grad direkte information om filterdriften, og om denne forringes. Dette giver desuden mulighed for at benytte turbiditetssensorer til styring.

Iltsensorer blev anvendt på Vognsbøl vandværk og på Dalumværket. På Vognsbøl vandværk var sensoren installeret direkte efter luftningsenheden, mens den på Dalumværket var installeret efter den fælles filterafgang. Placeringen af en iltensor afhænger af, hvad man ønsker at monitorere. Ved at placere en iltensor efter luftningsenheden får man et direkte mål for luftningseffektiviteten, når iltkoncentrationen sammenholdes med vandtemperaturen, og alarmer kan relativt enkelt indlægges som funktion af vandtemperaturen.

Placeres iltsensoren efter filtrene, kontrolleres om iltindholdet fortsat er tilstrækkeligt højt til distribution efter et eventuelt forbrug forårsaget af filternes mikroorganismer. Returskylles med luft eller en blanding af vand og luft, vil luft fanget i filtrene efter returskyl give øget iltkoncentrationer i forbindelse med opstart af filtret, hvilket skal lægges ind i forbindelse med fastsættelse af alarmer. På Dalumværket brugte luftningsenheden lidt tid på at justere ind efter en ændring i indvindingsflowet, og i sådanne tilfælde må alarmerne kobles til indvindingsflowet, hvis det er ønsket at indlægge snævre alarmgrænser, der kan fange mindre anomalier.

Hos vandforsyningerne i projektet blev on-line sensorerne anvendt til kvalitetskontrol af:

- Filterfunktionalitet ved turbiditetmåling efter filtre (alle anlæg)
- Afgangsværdier af turbiditet (Dalumværket og Vognsbøl vandværk)
- Afgangsværdier af ilt, pH og ledningsevne (Dalumværket)
- Iltniveau efter filtrene (Dalumværket)
- Iltningseffektiviteten ved sammenhørende ilt- og temperaturmåling efter luftningsenheden (Vognsbøl vandværk)

Desuden kunne der være kvalitetskontrol af:

- Råvandsstabilitet (forurening) ved ledningsevнемåling indgang værk

Værkerne har endvidere anvendt on-line sensorerne til at optimere på processer, fx:

- Filterdrift
- Returskylprocedure
- Indkøring af luftningsenhed

Ydermere kunne on-line sensorerne i højere grad anvendes til styring af processer frem for regulering efter flow, passeret vandvolumen eller fast tid. Fx styring af:

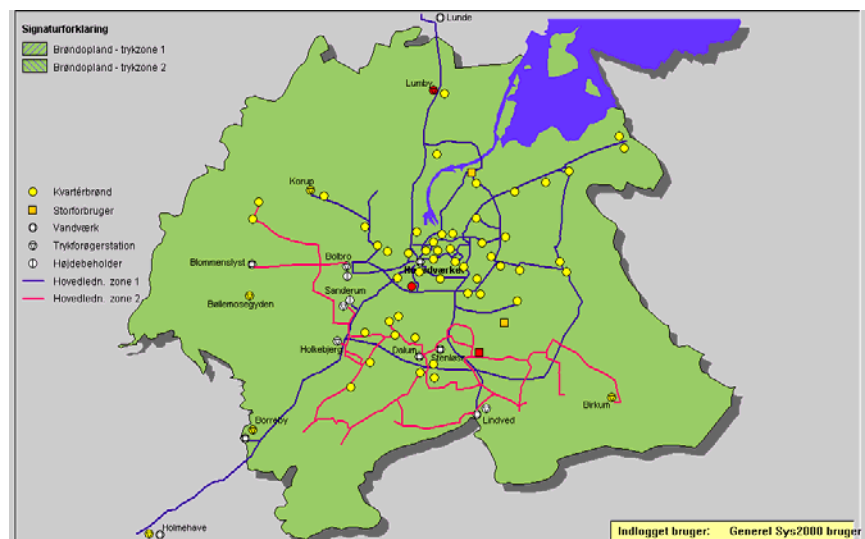
- Start af returskyl, når et vist gennembrud nås i turbiditet
- Løbende justering af luftningsenhed efter iltkoncentration

## 4 Sensortidsserier fra ledningsnet

Vandforsyningerne tog først sensorer i brug til driftsovervågning af ledningsnettet, hvor der forsat er flest sensorer, fortrinsvis til monitorering af tryk, flow og temperatur monteret i brønde. Det er også disse sensorer, der er størst erfaring med, og som inddrages mest direkte i den daglige drift. Dette kapitel giver eksempler på tidsserier fra ledningsnettet, og hvordan de anvendes.

Monitoreringen i brønde anvendes til at overvåge forbrug og trykzoner i ledningsnettet samt til lækagesøgning. Brud giver pludselig og kraftig lokal ændring i flow og tryk, så bruddet først og fremmest registreres, og indkredser området, hvor bruddet skal søges.

Hos VandCenter Syd A/S leder 6 vandværker vand ind på ca. 1.000 km ledningsnet. Ledningsnettet er inddelt i 11 trykzoner, hvoraf de to største: Zone 1 og zone 2 (Figur 54) udgør hovedparten af forsyningsområdet. Der er 55 brønde ud over ledningsnettet fordelt med 41 brønde i zone 1 og 14 brønde i zone 2 (Figur 54).



Figur 54: Oversigt over VandCenter Syd A/S forsyningsnet opdelt på zone 1 og zone 2 med angivelse af placering af brønde og vandværker.

I hver brønd monitoreres flow, tryk og temperatur (sensorer installeret i perioden 1996-2009 - Figur 55). Der er fastsat grænser for max flow og min tryk, så hvis både grænsen for tryk og flow overskrides i mere end 30 sekunder, sendes der omgående alarm til driftspersonalet. "Normal-niveauer" for tryk og flow kan variere meget fra brønd til brønd afhængig af placering på ledningsnettet (eksempler på niveauer i Figur 57 og Figur 58), og alarmgrænser er derfor sat individuelt for hver enkelt brønd. For hver enkelt brønd er der en relativ fast døgnvariation, hvor weekender ofte kan identificeres med eget niveau og variation (fx brønd 1.110 i Figur 57 og brønd 2.S02 i Figur 58) grundet forbrugsvariation imellem hverdage og weekender.

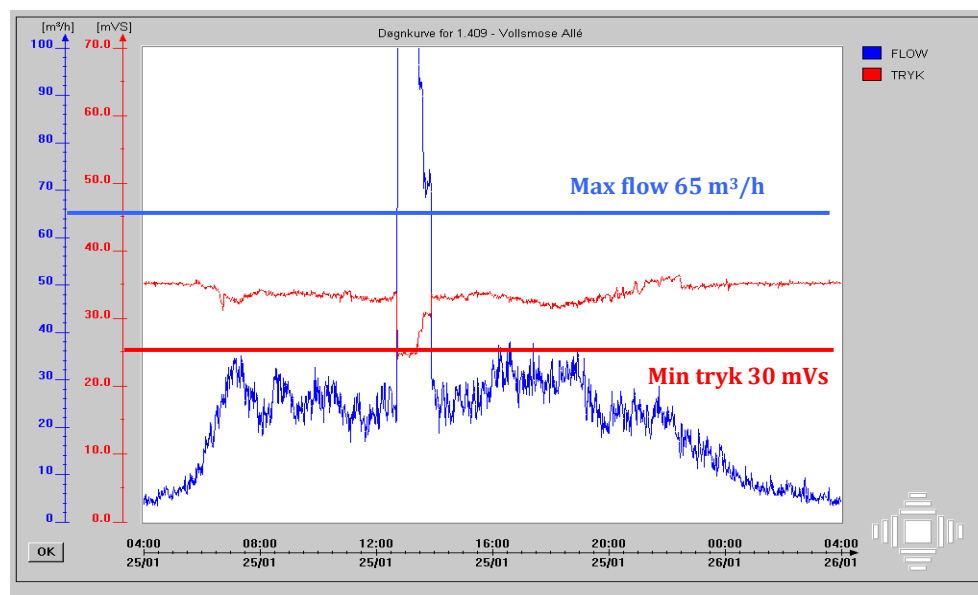


Figur 55: Installation i brønd på ledningsnettet med sensorer til monitorering af flow, tryk og temperatur samt installationskabinettet, VandCenter Syd A/S.

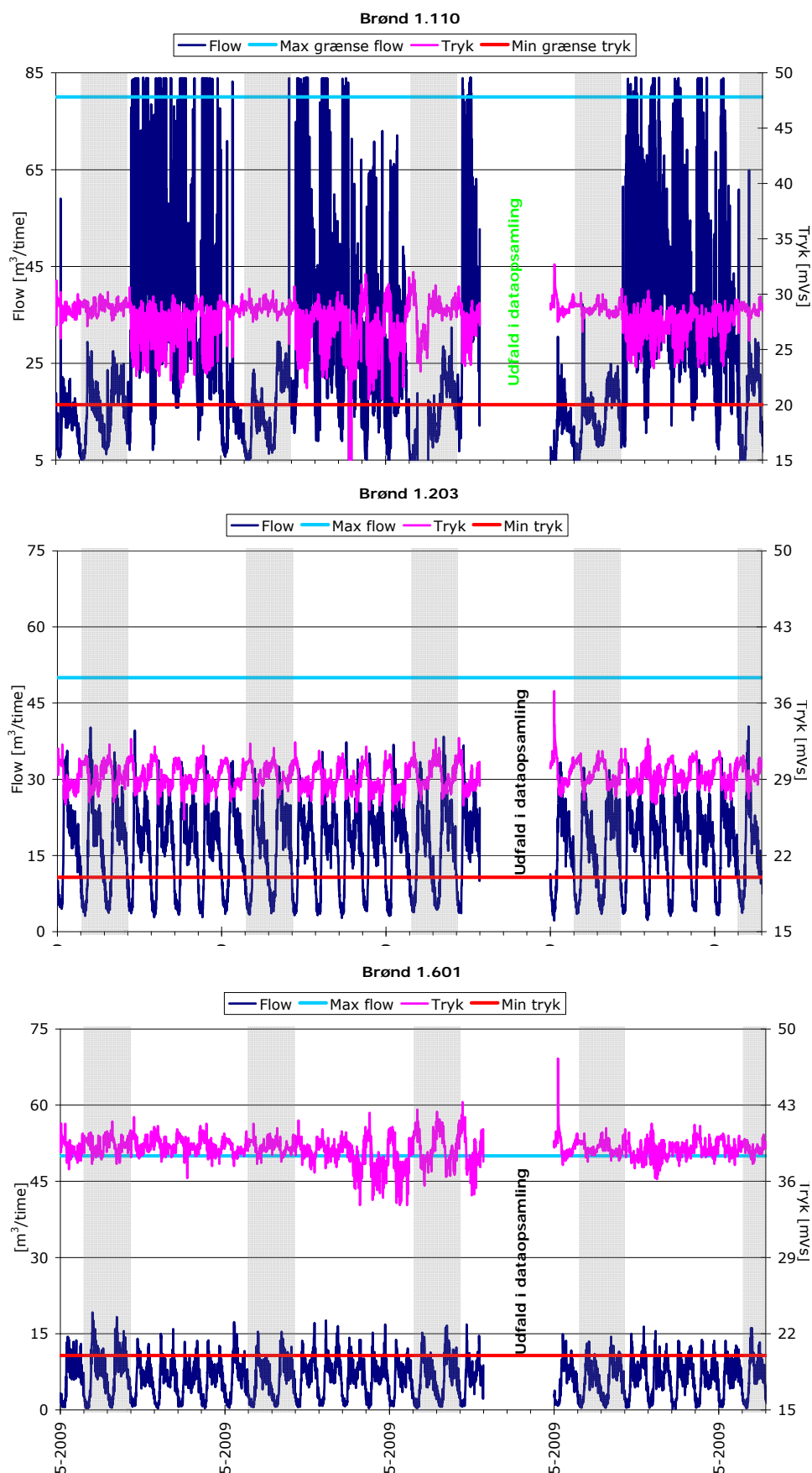
Døgnvariationen i den enkelte brønd afhænger af forbruget i området og vil være påvirket af aktiviteten i området, fx er brønd 1.110 (Figur 57) påvirket af industrien Odense Marcipan. Derved opstår gentagende overskridelser af max grænse for flow, men da overskridelserne alle er kortere end 30 sekunder giver dette ikke anledning til alarm.

Alarmgrænserne for brud er sat, så der ikke reageres på døgnvariationer, men kun på ekstremhændelserne som brud (eksempel på brud-profil i Figur 56) eller brandslukning, hvorved alarmgrænserne ligger på et langt højere/lavere niveau end "normal-niveauerne".

Temperatur-værdier gemmes hos VandCenter Syd A/S udelukkende som døgnmiddel, og anvendes først og fremmest til årsstatistikker. Generelt vil årsvariationen afhænge af brøndens placering på nettet. Dette betyder at i brønde, hvor vandet har kort opholdstid i ledningsnettet, er årsvariationen lille, mens brønde, hvor vandet har en længere opholdstid, er årsvariationen større (eksempler på temperatur-årskurver i Figur 59).

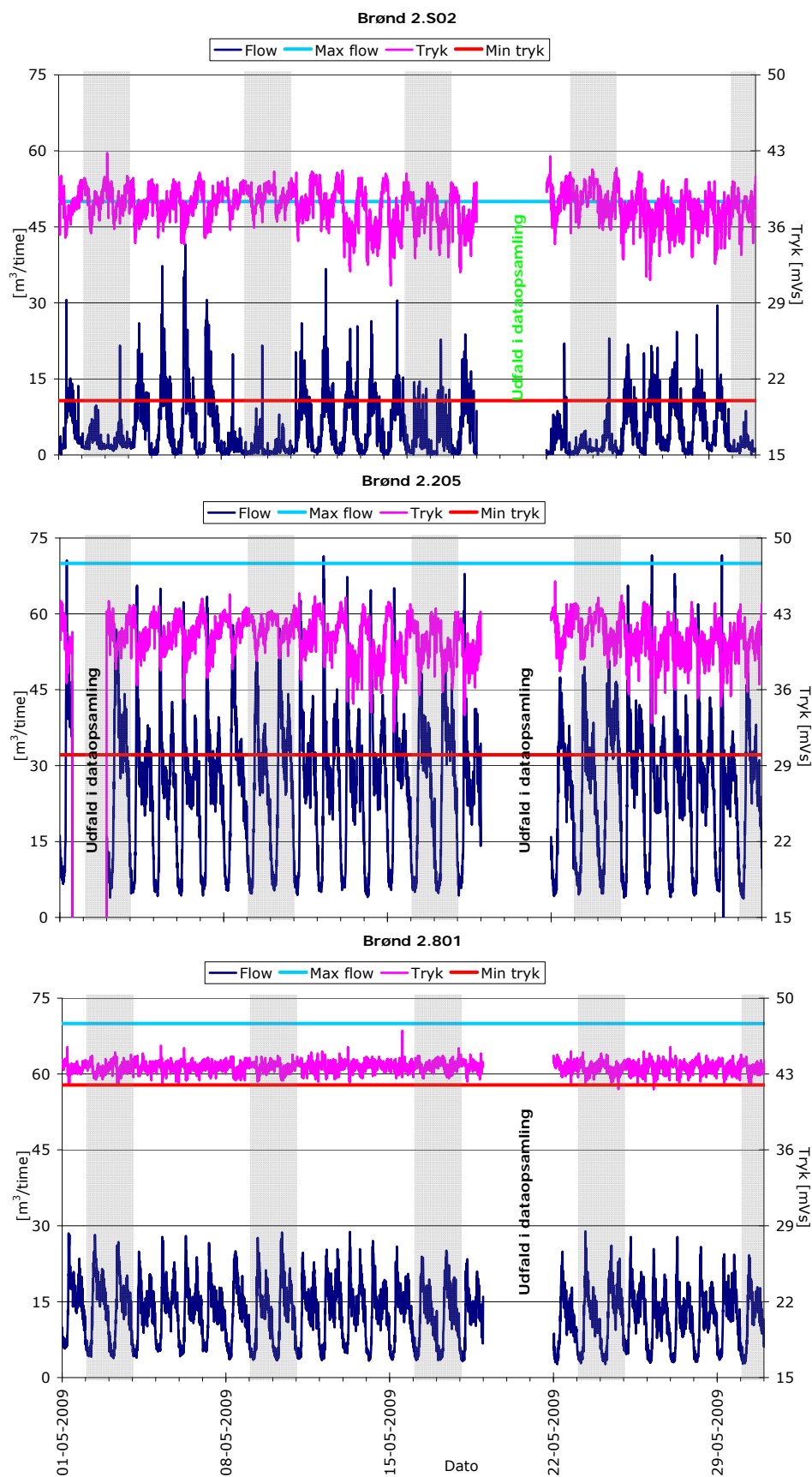


Figur 56: Eksempel på profil for brud på ledningsnet med angivelse af overskredne alarmgrænser for flow og tryk (1 min-værdier), VandCenter Syd A/S.

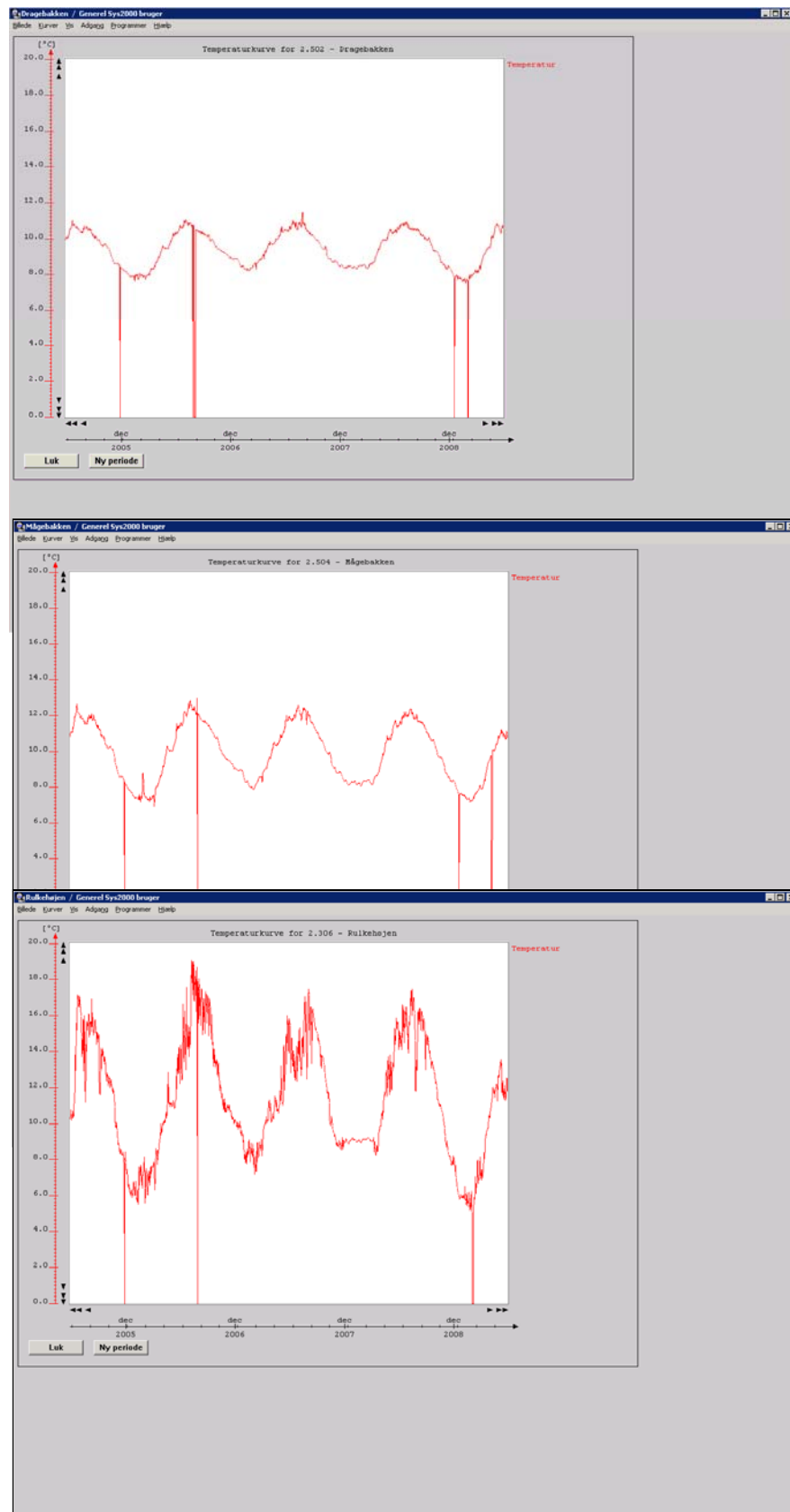


Figur 57: Eksempler på niveauer af tryk og temperatur i brønde på ledningsnettet hos VAndCenter Syd A/S (10 min-værdier). Grænser for alarmer indlagt som max flow og min tryk. Skravering angiver weekend. Udfald relaterer kun til arkivering af sensormålinger, værdier har været tilgængelige for brugerne direkte i systemet 3 uger tilbage.



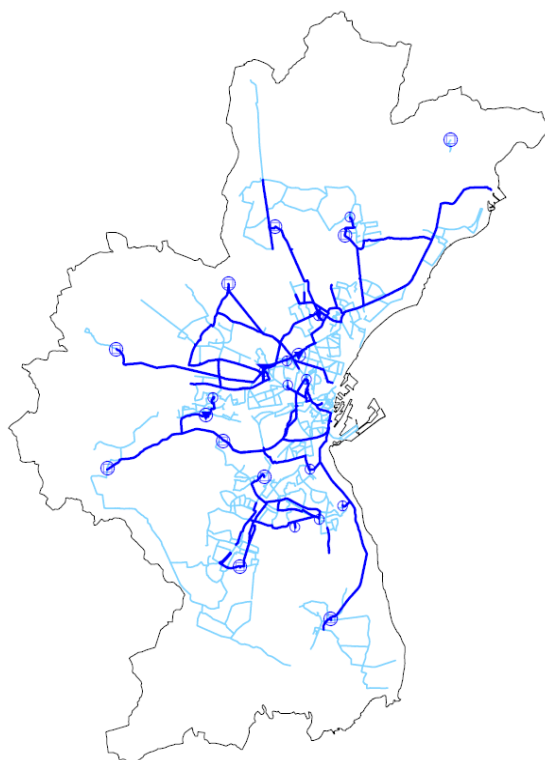


Figur 58: Eksempler på niveauer af tryk og temperatur i brønde på ledningsnettet hos VAndCenter Syd A/S (10 min-værdier). Grænser for alarmer indlagt som max flow og min tryk. Skravering angiver weekend. Udfald relaterer kun til arkivering af sensormålinger, værdier har været tilgængelige for brugerne direkte i systemet 3 uger tilbage.



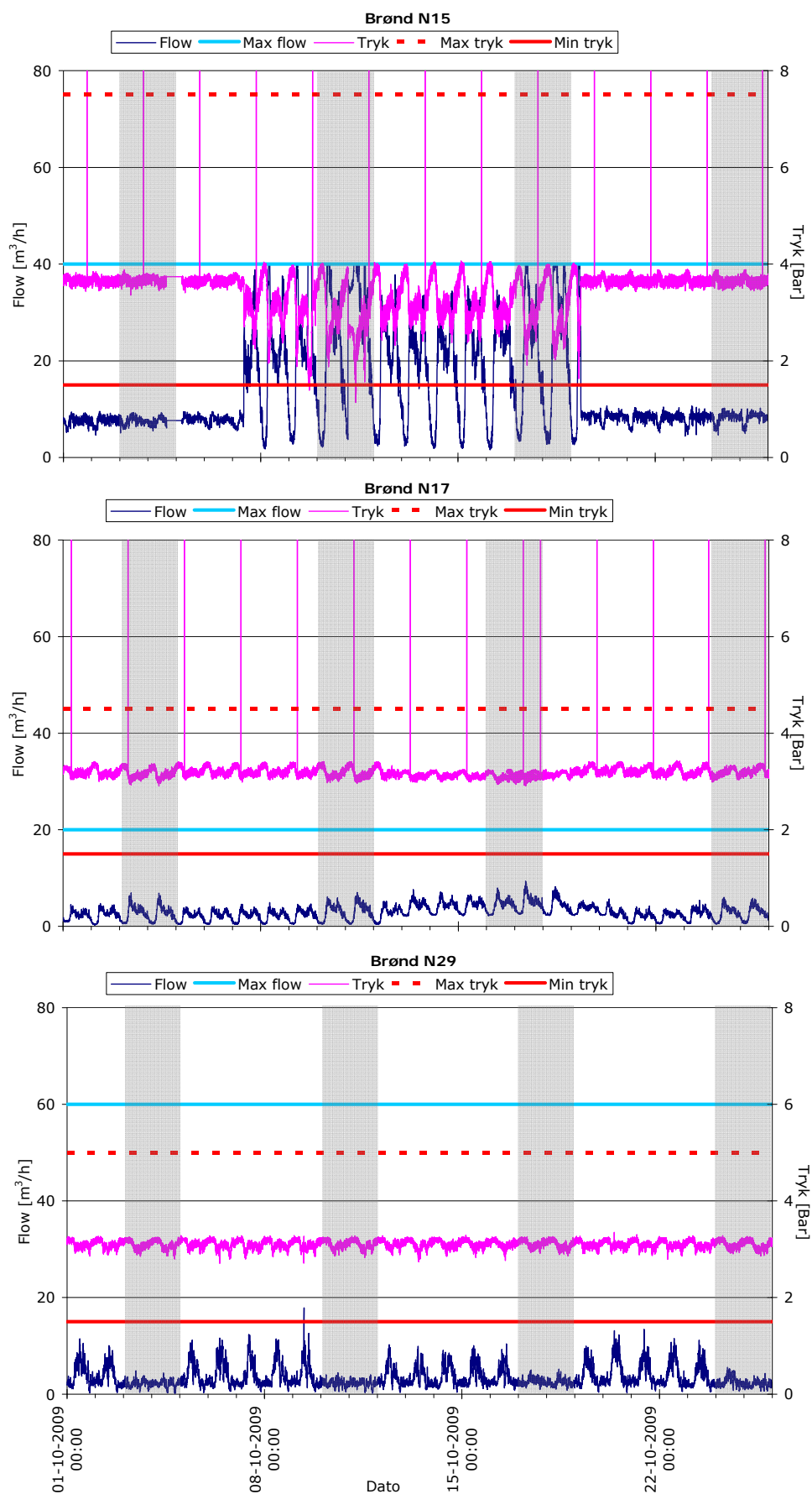
Figur 59: Eksempler på årsvariationer på temperatur i brønde, hvor vandets opholdstid i ledningsnettet er varierende med korteste opholdstid ved brønd 2.502 og længste opholdstid ved brønd 2.306 (døgn-værdier), VandCenter Syd A/S. Lodrette udfald skyldes dataarkiveringsfejl.

Hos Århus Vand A/S leder 10 vandværker vand ind på ca. 1.500 km ledningsnet (Figur 60). Ledningsnettet er opdelt i 14 zoner, der yderligere kan være sektioneret i op til 10 sektioner. Der er fordelt 60 brønde over ledningsnettet, hvori der monitoreres for flow, tryk og temperatur (sensorer installeret i perioden 2000-2009). Der er fastlagt grænser for max flow (min flow sat til 0 m<sup>3</sup>/h), min og max tryk samt max temperatur, men disse grænser er kun vejledende og er ikke tilsluttet alarmer. Hvornår et niveau er afvigende og indikerer et brud eller anden hændelse er en erfaring, der ligger hos driftspersonalet, og som vurderes manuelt i den daglige drift ud fra kendskab til "normal-niveauer" (eksempler på niveauer Figur 61 - Figur 62).



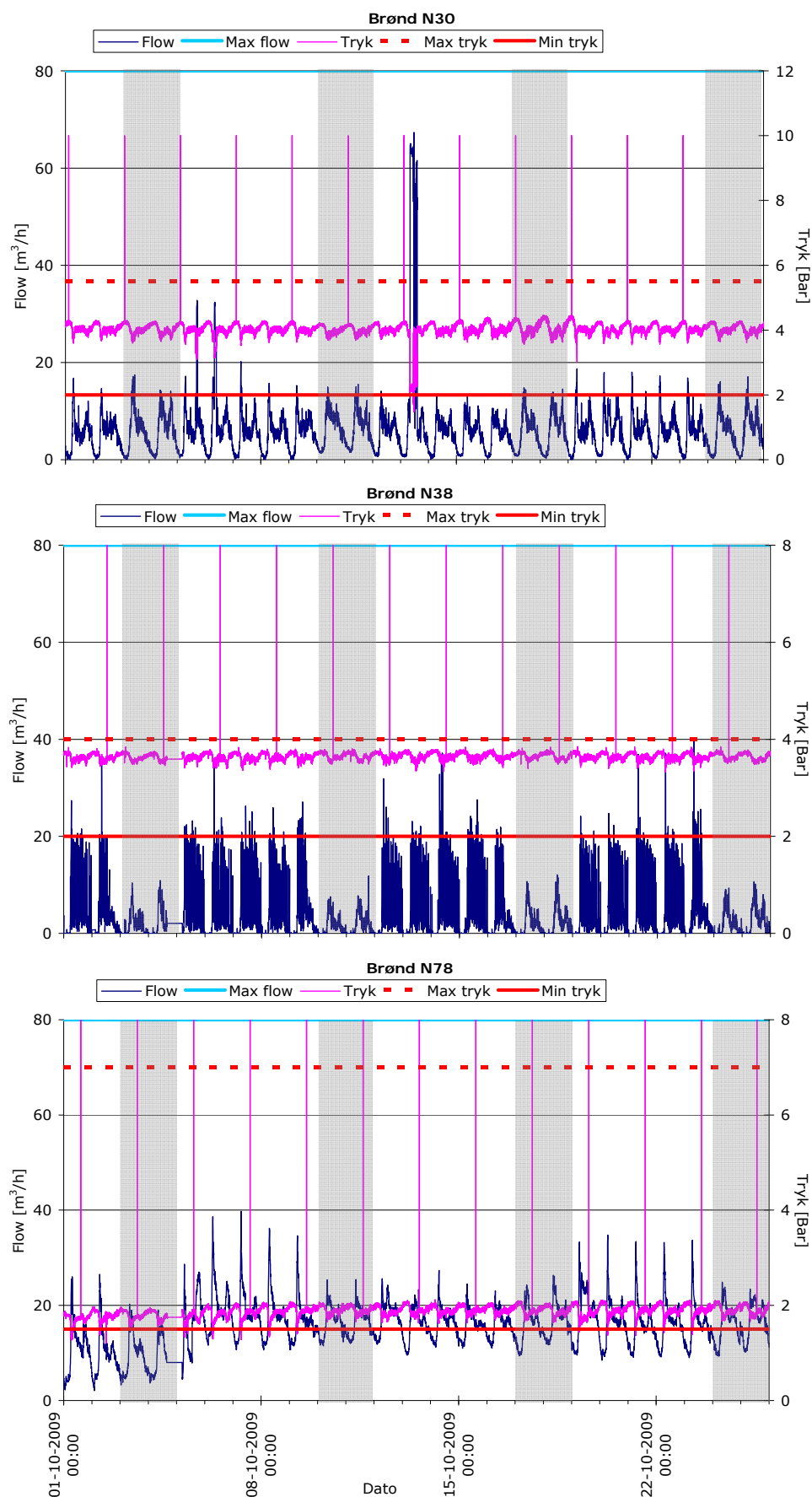
Figur 60: Oversigt over Århus Vand A/S forsyningsnet. ○ angiver placering af vandværker.

For at kunne vurdere afvigelser fra "normal-niveauerne" forudsættes et godt overblik over afvigende drift på ledningsnettet. Fx viser data fra brønd N15 (Figur 61) en kraftig ændring i "normal-niveauerne" over 12 døgn, hvilket skyldtes en sektionering af området ved lukning af ventiler i forbindelse med lækagesøgning. Data fra brønd N17 (Figur 61) viser en mindre stigning i flowet henover uge 41, hvilket skyldes, at området fortrinsvis er udlagt til sommerhusområde, hvor der var større aktivitet i efterårsferien. Profiler for hverdage og weekender variere oftest i områder præget af industri (fx brønd N29 i Figur 61 og brønd N38 i Figur 62). Data fra brønd N38 (Figur 62) viser en så kraftig afvigelse, at den generelt vil blive tolket som et brud. Forsyningen ledte efter brud, indtil det viste sig, at en storforbruger var ved at fylde et reservoir uden forud at have meldt det til forsyningen. Data fra brønd N78 (Figur 62) viser effekten af en lang række mindre brud. Efter forbrugerklager over lavt tryk skulle forsyningen oprette ny sektion med højere tryk, men ved åbning af sektionen blev der ved fejl åbnet til et for højt tryk, der medførte en række mindre brud i området, som resulterede i et merforbrug på omkring 10 m<sup>3</sup>/h.



Figur 61: Eksempler på niveauer af tryk og temperatur i brønde på ledningsnettet hos Århus Vand A/S (1 min-værdier for tryk, 5 min-værdier for flow). Vejledende grænser indlagt som

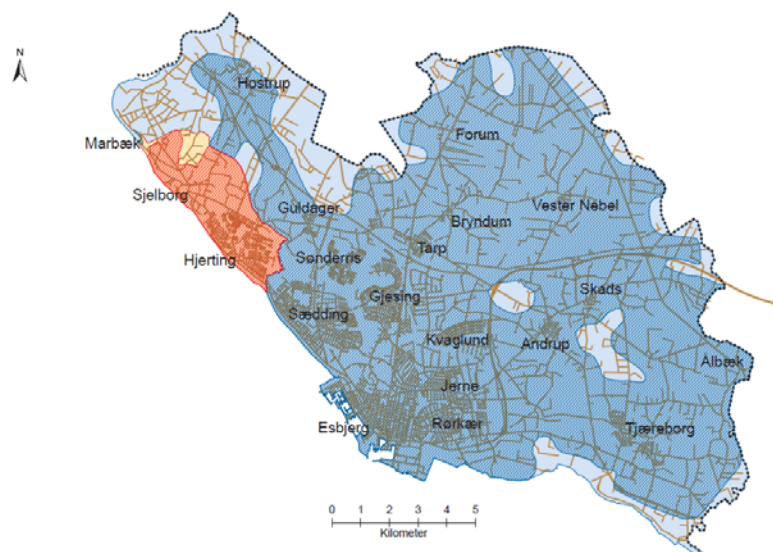
max flow (min flow = 0 m<sup>3</sup>/h) samt min og max tryk. Skravering angiver weekend. Lodrette udfald skyldes dataoverførsesfejl.



Figur 62: Eksempler på niveauer af tryk og temperatur i brønde på ledningsnettet hos Århus Vand A/S (1 min-værdier for tryk, 5 min-værdier for flow). Vejledende grænser indlagt som

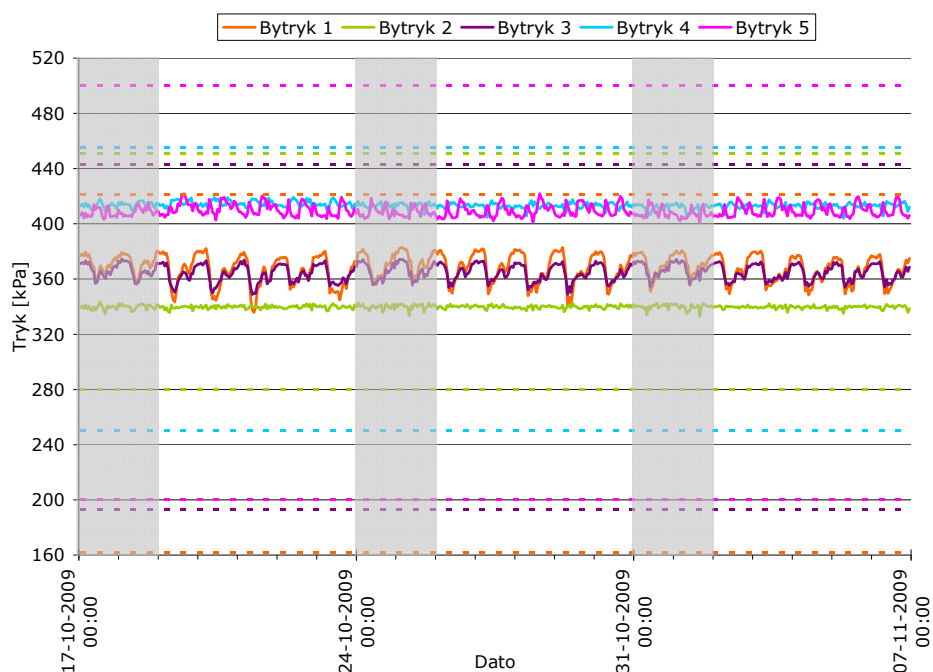
max flow (min flow = 0 m<sup>3</sup>/h) samt min og max tryk. Skravering angiver weekend. Lodrette udfald skyldes dataoverførsesfejl.

Esbjerg Forsyning A/S leverer vand fra 4 vandværker ud på et ca. 580 km ledningsnet, der er sektioneret i 5 bytryk. Et af vandværkerne leder en konstant døgn-produktion ud på nettet, mens de tre øvrige værker via SRO-systemet producerer efter det aktuelle forbrug, hvor udpumpningen styres efter, at Bytryk 2 konstant skal ligge omkring 340 kPa.



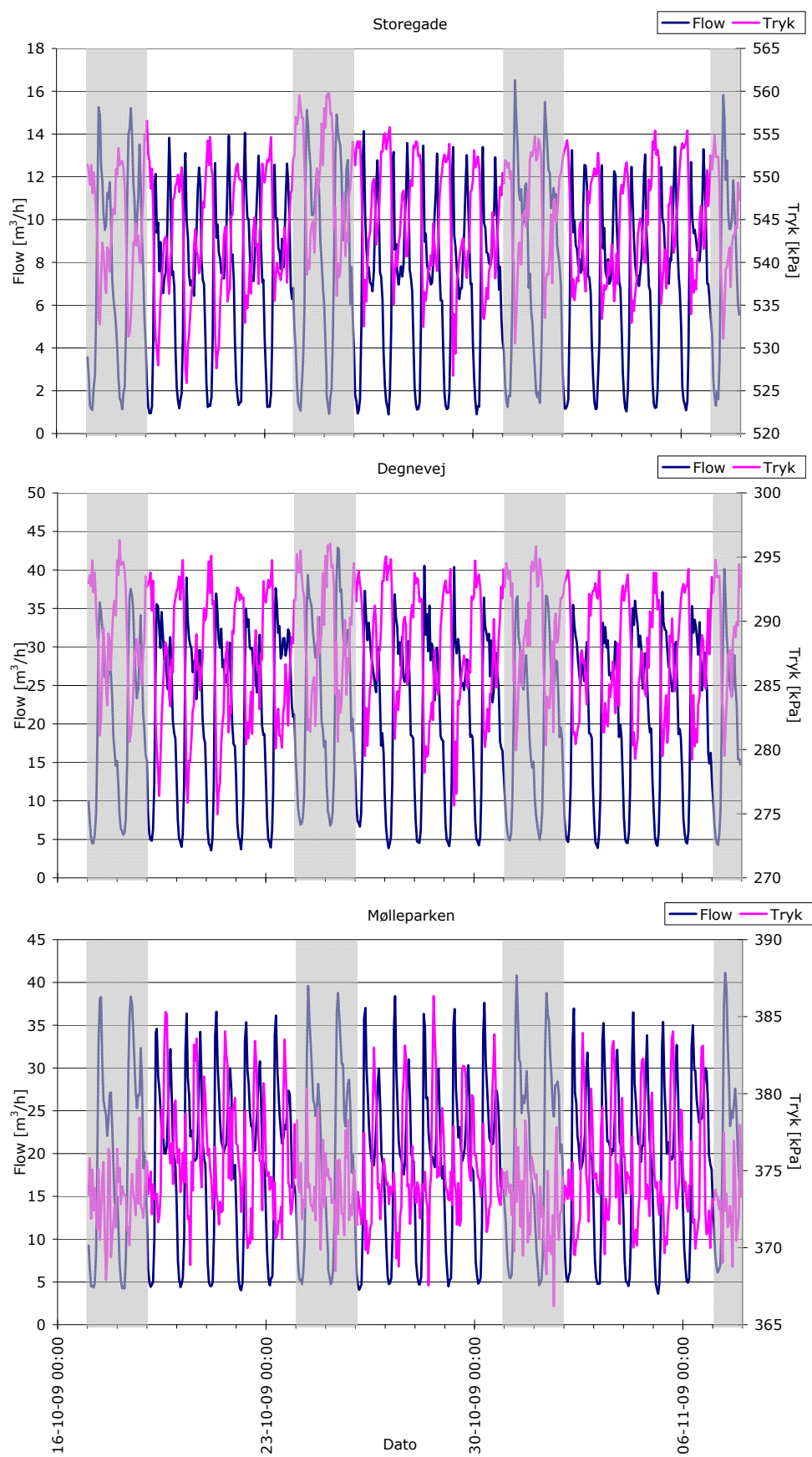
Figur 63: Oversigt over Esbjerg Forsyning A/S ledningsnet.

Der er indlagt min og max grænser for de 5 bytryk (Figur 64), hvor der omgående sendes alarm til driftspersonalet i tilfælde af overskridelser. Derudover er der yderligere 8 målebrønde på nettet, hvori tryk, flow og temperatur modsvarende Odense og Århus monitoreres for at overvåge forbrug og til lækagesøgning (eksempler på niveauer Figur 65).



Figur 64: Eksempel på bytryk hos Esbjerg Forsyning A/S (time-værdier). Alarmgrænser indlagt med stiplede markering som min og max tryk. Skravering angiver weekend.

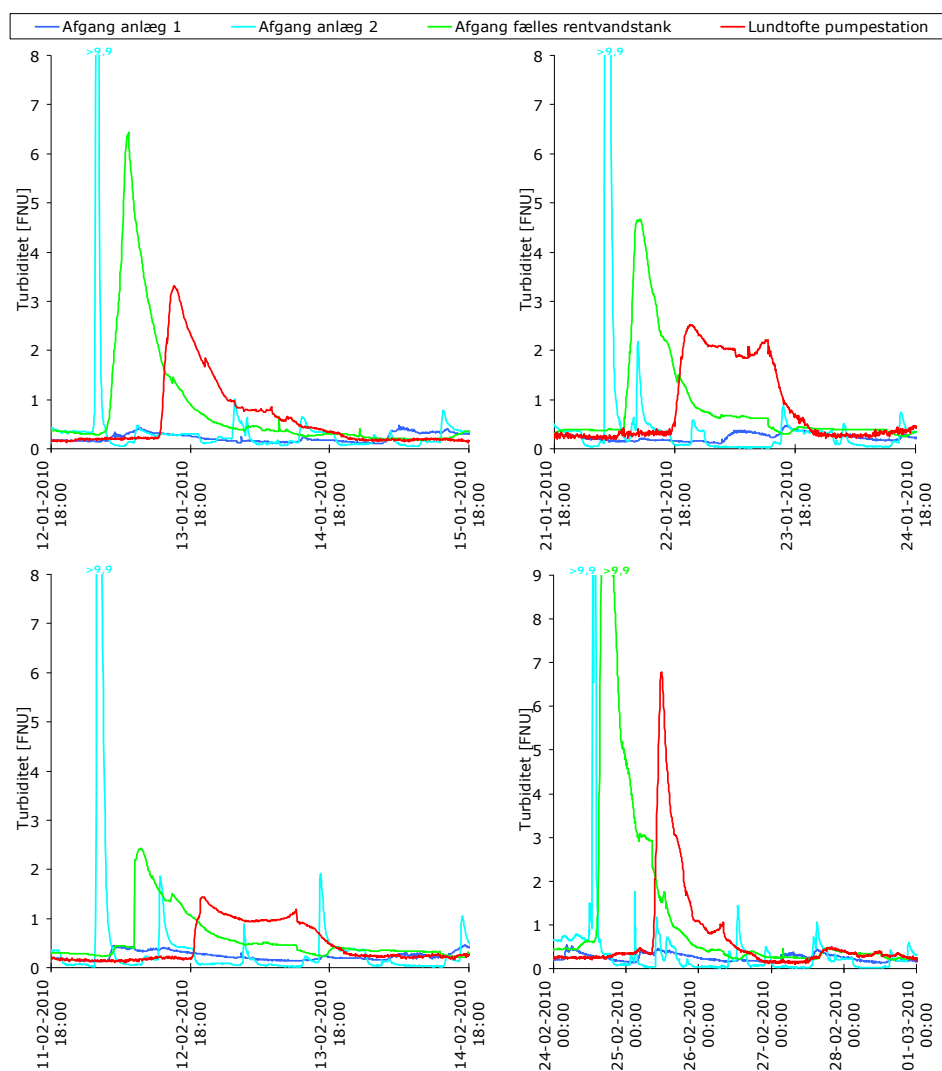




Figur 65: Eksempler på niveauer af tryk og temperatur i brønde på ledningsnettet hos Århus Vand A/S (5 min-værdier). Skravering angiver weekend.

Sensorer til on-line monitoring af tryk, flow og temperatur i brønde på ledningsnettet er således et stærkt værktøj til driftsovervågning af ledningsnettet, hvormed sektioner med lang opholdstid kan identificeres og lækager identificeres, men de giver begrænset information om selve drikkevandskvaliteten. Monitoring af parametre som turbiditet og ledningsevne vil formentlig være bedre som proxy-parametre til vurdering af drikkevandskvaliteten.

Nordvand A/S har turbiditetssensorer placeret på Sjælsø vandværk efter filtrene på anlæg 1 og 2 og ved afgang fra fælles rentvandstank (jævnfør afsnit 3.4), men derudover også ude på ledningsnettet ved Lundtofte pumpestation, der forsynes fra Sjælsø vandværk. I januar-februar kom kraftige turbiditetstoppe (>9,9 FNU) fra anlæg 2 forårsaget af en defekt filterventil under returskyl af efterfilter 2. Turbiditetstoppene kunne genfindes i afgang fra den fælles rentvandstank (2,5- >9,9 FNU) 5-8 timer senere og endnu ca. 9-13 timer senere også som turbiditetstop (1,4-6,7 FNU) på ledningsnettet ved Lundtofte pumpestation (Figur 66). Turbiditetsensorer på ledningsnettet vil således kunne bidrage med information om vandkvaliteten efter vandet har forladt vandværket, samt evt. forringelser i ledningsnettet.



Figur 66: Eksempel på hvordan turbiditetstop fra anlæg 2, Sjælsø vandværk, Nordvand A/S kan genfindes som turbiditetstop ved afgang fælles rentvandstank og ude på ledningsnettet ved Lundtofte pumpestation (1 min- værdier).

Københavns Energi A/S har ved Tipperup bygningsværk ved Søndersø installeret en ledningsevnesensor på råvandsledningen. Råvandsledningen ligger der tæt på en kloakledning, så ledningsevne monitoreres on-line for at kunne opdage og reagere på en forurening fra kloakledningen.

#### 4.1 Diskussion af sensortidsserier fra ledningsnet

Hos vandforsyningerne i projektet sidder størstedelen af sensorer til at monitorere vandkvalitetsparametre (turbiditet, ledningsevne, pH og ilt) på selve vandværkerne. Ved en forurening vil forureningen dog ofte indtræffe ude på ledningsnettet, efter vandet har forladt vandværket. Sensorer til on-line monitoring af turbiditet og ledningsevne på ledningsnettet vil formentlig kunne bidrage til, at forureningssager opdages tidligere. En mindre forurening som en enkelt fugleklat i et vandtårn, vil givetvis ikke ændre tilstrækkeligt på turbiditet og ledningsevne til, at forureningen opdages, på trods af, at *E. coli* kvalitetskravet overskrides. En kraftig forurening, som Køge-sagen fra 2007, hvor behandlet spildevand blev pumpet ud i drikkevandsledningsnettet, vil derimod give udslag på begge type sensorer, og forureningen blive opdaget tidligt.

I projektets forsyninger er on-line sensorer til monitoring af tryk, flow og temperatur udbredt i brønde på ledningsnettet. Disse udgør i dag et stærkt værktøj til driftskontrol ved:

- Lækageovervågning
- Trykzone-optimering
- Identifikation af zoner med lange opholdstider

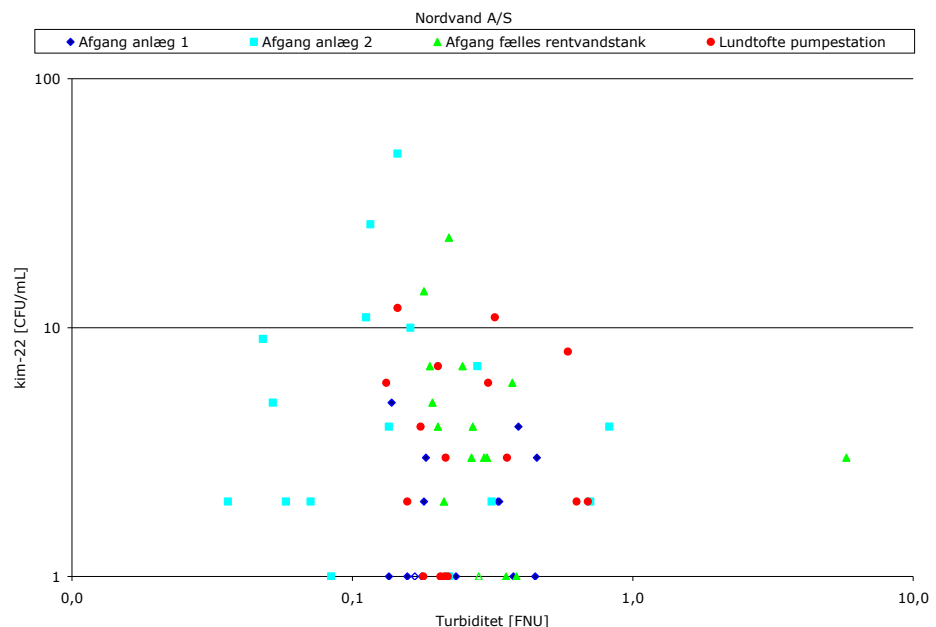
Ydermere vil on-line sensorer til at monitorere ledningsevne og turbiditet på selv ledningsnettet gøre det muligt at:

- Følge en afvigende vandkvalitet (fx forhøjet turbiditet fra afgang værk) ud igennem ledningsnettet
- Opdage forureninger af større målestok tidligt
- Følge større forureninger ud igennem ledningsnettet.

## 5 Sensorer og mikrobiologisk kvalitet

Der er i dag flere tiltag i gang med udvikling af on-line sensorer til mikrobiologiske parameter og specifikke stoffer i drikkevand, men der er endnu ingen – eller meget få - kommercielle sensorer tilgængelige. For at undersøge anvendeligheden af on-line sensormålinger for fysiske parametre som proxy-målinger for drikkevandskvalitet, vil on-line sensormålinger af fysiske parameter i dette kapitel blive sammenholdt med analyse af mikrobiologiske parametre.

Vandforsyningerne i projektet tager alle langt flere drikkevandsprøver til mikrobiel analyse, som en del af deres egenkontrol, end hvad der lovmæssigt kræves. Eksempelvis udtager VandCenter Syd A/S prøver til begrænset kontrol fra hver af deres brønde hver 2-6 måned (8-14 brønde per måned – i alt 108 begrænsede kontroller per år) og Nordvand A/S udtager prøver til mikrobiel analyse (i Gentofte området) fra deres værker og tårne hver mandag (16 prøvesteder) og torsdag, og torsdage desuden fra skoler mm. (i alt 28 prøvesteder). Selv om denne prøvfrekvens giver et godt billede af niveauerne af de mikrobiologiske parametre i forsyningen, vil en forurening ikke blive opdaget, når den opstår, medmindre prøven tages direkte efter forureningens opståen, og kortvarige forureninger risikerer fortsat at blive overset.



Figur 67: Sammenhæng imellem turbiditet og kimtal-22 målt af Nordvand A/S ved mikrobielle analyser to gange om ugen i perioden januar-februar 2010 på Sjælsø vandværk (afgang anlæg 1, afgang anlæg 2, afgang fælles rentvandstank) og på ledningsnettet ved Lundtofte pumpestation. Åbne symboler angiver <1 CFU/mL. Bemærk logaritmiske akser.

Vil fx on-line turbiditetsmålere kunne varsle om forhøjede kimtal?  
Sammenholdes som eksempel Nordvand A/S's mikrobielle analysedata for

kimtal-22 for Sjælsø Vandværk og Lundtofte pumpestation for perioden januar-februar 2010 med turbiditetsmålinger (5 min-værdier), er der ikke umiddelbart nogen direkte sammenhæng imellem kimtal-22 og turbiditet (Figur 67). For direkte at sammenligne on-line sensormålinger og mikrobiologiske parametre blev der gennemført to målekampagner ved hændelser, der forventedes at give et markant udslag på sensormålingerne:

- Opstart af forfilter efter returskyl på anlæg 2, Sjælsø vandværk, Nordvand A/S
- Idriftsættelse af en ledningsstrækning på forsyningsnettet hos VandCenter Syd A/S.

On-line sensormålinger (turbiditet, ledningsevne, ilt, pH, temperatur) blev sammenholdt med mikrobiologiske parametre i vandprøver udtaget med høj frekvens.

Vandprøver blev analyseret for:

- kimtal-20 og kimtal-37, en del af bekendtgørelsens kontrol. Udføres som dybdeudsæd som henholdsvis  $\text{HPC}_{\text{Gær}, 22\text{C}, 72 \text{ timer}}$  og  $\text{HPC}_{\text{Gær}, 37\text{C}, 48\text{h}}$
- kimtal-20, alternativ kimtalsbestemmelse med en agar med bredere substratsammensætning og længere inkubationstid, der tillader en større andel af bakterierne at danne kolonier (kim), hvilket kan tydeliggøre variationer. Udføres som overfladeudsæd som  $\text{HPC}_{\text{R2A}, 20\text{C}, 14 \text{ døgn}}$
- $\text{ATP}_{\text{Total}}$  og  $\text{ATP}_{\text{Frit}}$ , Adenosine triphosphat (ATP) er energibærende molekyle i alle levende celler og kan således anvendes som alternativt mål for celleaktivitet. Ved celledød lækkes ATP til omgivelserne, og det er således relevant både at bestemme det cellulære ATP og det frie ATP. Der analyseres for  $\text{ATP}_{\text{Total}}$  og  $\text{ATP}_{\text{Frit}}$ , hvorefter  $\text{ATP}_{\text{Celle}}$  beregnes som forskellen imellem de to
- coliforme/*E. coli*, en del af bekendtgørelsens kontrol. Udføres som Colilert®

Desuden blev vandprøverne analyseret for total jern og mangan, der hovedsagligt bidrager til turbiditeten i drikkevand.

Prøver blev udtaget i sterile flasker: syrevaskede og brændte glasflasker med låg indeholdende teflon-indlæg. Prøverne blev efter udtagning opbevaret på køl indtil analyse senere samme dag.

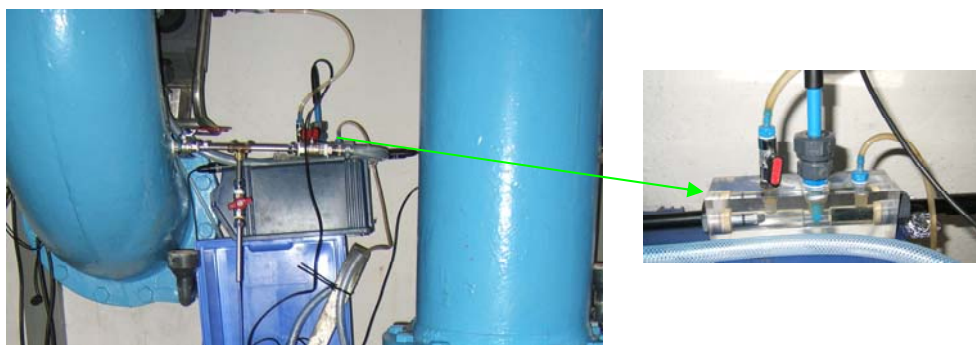
### 5.1 Opstart af forfilter efter returskyl

Der blev målt før og efter et returskyl på forfilter 1 på anlæg 2, Sjælsø vandværk, Nordvand A/S. Forfiltret tages ud af produktion under returskyl: Tilgangsventilen til filtret lukkes, og vandstanden sænkes over 5 min, hvorefter afgangsventilen til filtret lukkes. Herefter skylles 3 min med en blanding af vand og luft, 5 min med vand, 2 min med blanding af vand og luft, hvorefter filtret ligger stille 50 min før opstart ved åbning af tilgangs- og afgangsventiler.

### 5.1.1 Målekampagne

Sensorer til monitoring af turbiditet, ledningsevne, ilt, pH og temperatur (logning én gang per minut) blev tilkoblet ved afgangsrøret fra forfilter 1 (Figur 68), hvor vandet ledes videre til efterfiltrene. Der blev monteret to prøvehaner, fra den første blev udtaget vandprøver og den anden ledte en delstrøm forbi sensorerne (først turbiditet, derefter de øvrige, Figur 68). Begge haner løb med et konstant flow på 600 mL/min. Disse målinger blev suppleret med anlæggets sensorer til at monitorere indvindingsflow til anlæg 2, samt turbiditet ved den fælles afgang fra anlæg 2 (1 min-værdier).

Der blev udtaget 4 vandprøver over en ½ time forud for returskyl og 31 vandprøver i løbet af de første 4 timer efter opstart af filtret. Returskyllet blev startet kl. 8:01 og filtret opstartet 9:09 d. 25/7 2010. Det efterfølgende returskyl af efterfilter 1 blev startet kl. 9:01 og efterfiltret opstartet kl. 9:49. Forud var forfilter 1 senest blevet returskyllet 18/-2010.



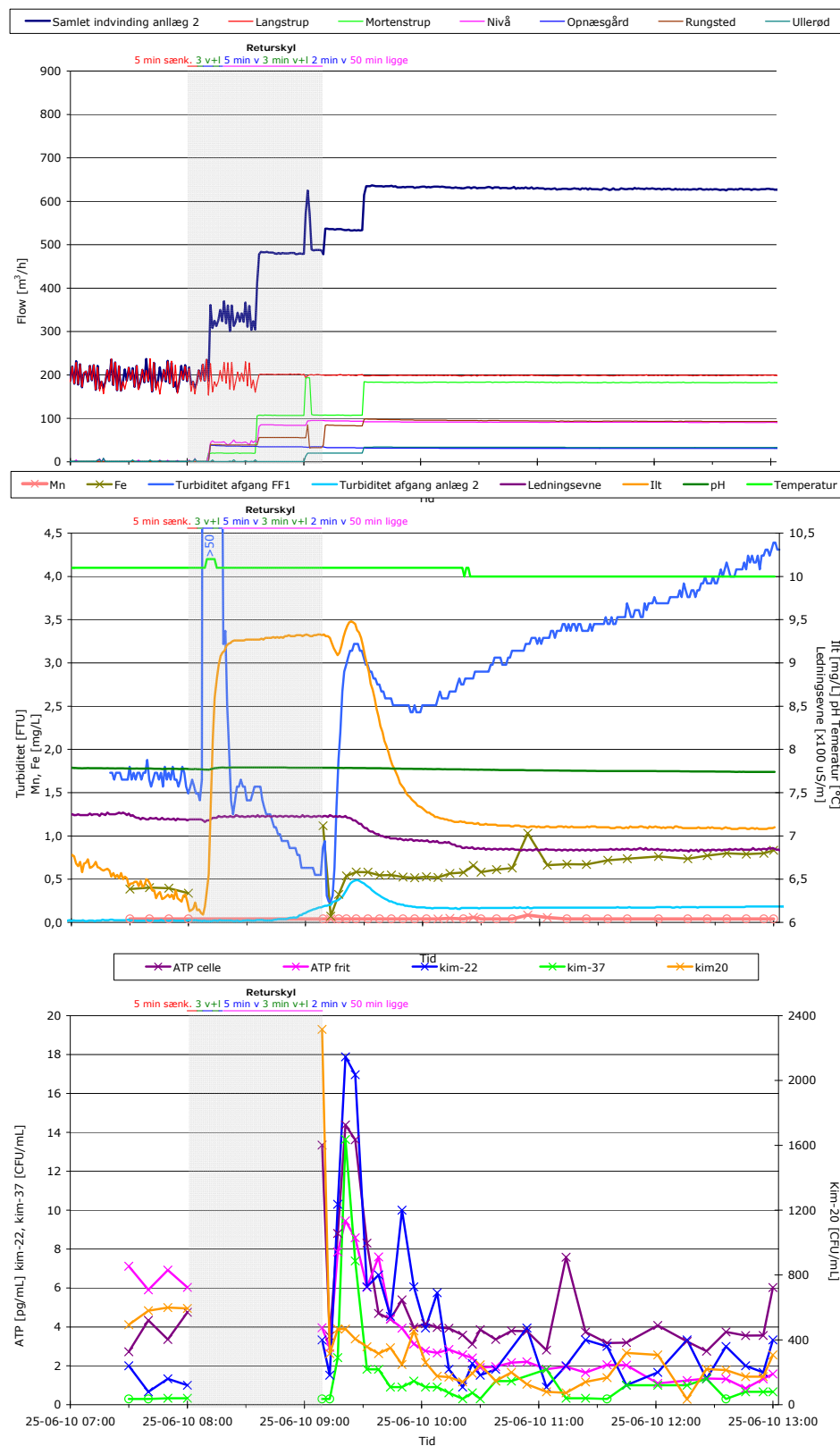
Figur 68: Målekampagne på forfilter 1, anlæg 2, Sjælsø vandværk, Nordvand A/S. Målinger foretages fra afgangsrøret fra forfilter 1, vandprøve tages fra første taphane, mens en delstrøm ledes fra anden taphane til turbidimeteret (øverst til venstre) og derefter til flowcelle med elektroder til måling af ledningsevne, pH og ilt.

### 5.1.2 Resultater

Turbiditeten i vandet i afgangsrøret steg til over 50 FNU under de 3 skyl med henholdsvis vand og en blanding af vand og luft, hvor der var stor bevægelse i filtret, og aftog derefter over filtrets liggeperiode (Figur 69B). Vandet passerede efterfølgende efterfiltrene, men turbiditetstoppen kunne alligevel genfindes som en mindre top med maksimum på 0,49 FNU kl. 9:28 (begyndende kl. 8:46) ved afgang anlæg 2 (Figur 69B). Efter lukning af afgangsventilen ved returskyllets start, burde vandet i afgangsrøret havde stået stille og sensorene vist et stabilt signal under returskyllet. Sensormålingerne viste tydeligt, at afgangsventilen fra forfilter 1 ikke sluttede tæt, så vand fra filtret under returskyl gik fra forfilter 1 gennem afgangsrøret videre til efterfiltrene. Iltniveauet i afgangsrøret steg ligeledes så snart vand- og luftskyllet begyndte og nåede et niveau på 9,3 mg/L, der blev fastholdt under den resterende returskylning. Vandtemperaturen steg ligeledes 0,1°C under luft-vandskyllet (Figur 69B) pga. en højere lufttemperatur.

Ved opstart af filtret steg turbiditeten (0,94 FNU) i afgangsrøret først meget kortvarigt, formentlig som følge af fuld ventilåbning. Derefter kom det rene returskyllevand, der stod under filtret ved returskyllets afslutning som et fald i turbiditeten (0,24 FNU), fulgt af en kraftig top i turbiditeten (3,2 FNU), da det resterende brugte returskyllevand, der havde stået inde i filtret, brød igennem. Herefter var turbiditeten en funktion af vand stående over filtret ved returskyllets slutning og influentvand, samt et højt indvindingsflow (ca. 630

m<sup>3</sup>/h - Figur 69A), der resulterede i en jævn stigning i turbiditeten over de næste tre timer. Iltprofilen i afgangsrørret fulgte tilsvarende mønster som turbiditeten. Passage af det rene returskyllevand fra under filtret medførte et lille fald i iltniveauet (9,1 mg/L), hvorefter iltniveauet steg, da vandet der stod i filtret ved returskyllets slut passerende (9,5 mg/L). I takt med at der blev ledt influentvand på filtret, faldt iltniveauet og stabiliserede sig på 7,1 mg/L.

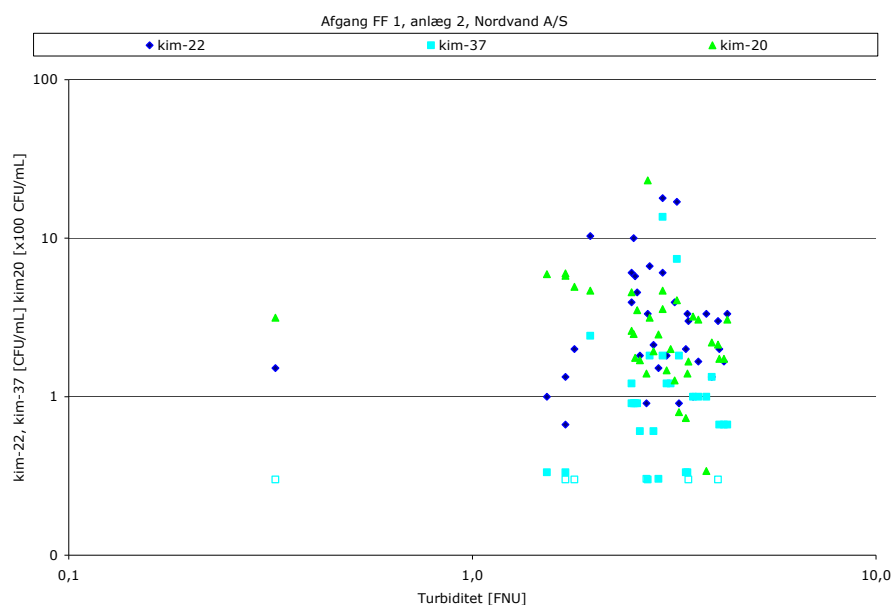


Figur 69: Indvinding (A), Sensormålinger og Fe/Mn (B) og mikrobiologiske målinfer (C) fra målekampagnen henover returskyl på forfilter 1, anlæg 1, Sjølsø vandværk, nordvand AS/. Åbne symboler angiver, at værdien var under analysens kvantifikationsgrænse (Mn= 0,04 mg/L) eller detektionsgrænse (kimal-37= 0,3 CFU/mL). Bemærk enhed for ledningsevne.

Ledningsevnen faldt, da influentvandet brød igennem, da råvandet forud for returskyl udelukkende kom fra Langstrup kildeplads, hvorimod råvand fra alle 6 kildepladser indgik i indvindingsvandet efter returskyllet (Figur 69A). Analyse af jern og mangan viste, at hovedsagligt jernforbindelser bidrog til turbiditeten. Mangankoncentrationen var under analysens kvantifikationsgrænse (0,04 mg/L) i 30 ud af 35 prøver, hvorimod jernkoncentrationen fulgte med turbiditetsprofilen efter returskyl.

Tilsvarende profiler gjorde sig gældende for kimal og ATP. Direkte efter opstart af filtret blev der målt en værdi svarende til fuld åbning af afgangsventilen, derefter kom en kraftig top, når vandet, der havde stået i filtret, passerede: ATP<sub>Celle</sub>= 14 pg/mL ATP<sub>Frit</sub>=9 pg/mL, kimal-22=18 CFU/mL, kimal-37=14 CFU/mL, kimal-20=467 CFU/mL), hvorefter parametrene stabiliserede sig på et relativt fast lavt niveau: ATP<sub>Celle</sub>=3-4 pg/mL, ATP<sub>Frit</sub>=1-2 pg/mL, kimal-22=1-4 CFU/mL, kimal-37=<1-2 CFU/mL, kimal-20=80-300 CFU/mL (Figur 69C). To af prøverne efter opstart af filtret (prøver udtaget kl.9:21 og kl. 10:26) var positive med 1 coliform/100 mL, men alle prøver var negative for *E. coli*, hvorved der ikke var indikation af en fækal forurening.

Der var således sammenhæng mellem sensormålingerne og vandkvalitetsparametre. Sammenligning af sammenhørende værdier for turbiditetsdata og kimal (Figur 70) viste ikke en direkte entydig sammenhæng. Dette skal til dels tilskrives, at de mikrobiologiske værdier var relativt lave, og at turbiditet steg som følge af gennembrud af jern fra influentvandet efter af de mikrobiologiske parametre havde stabiliseret sig.

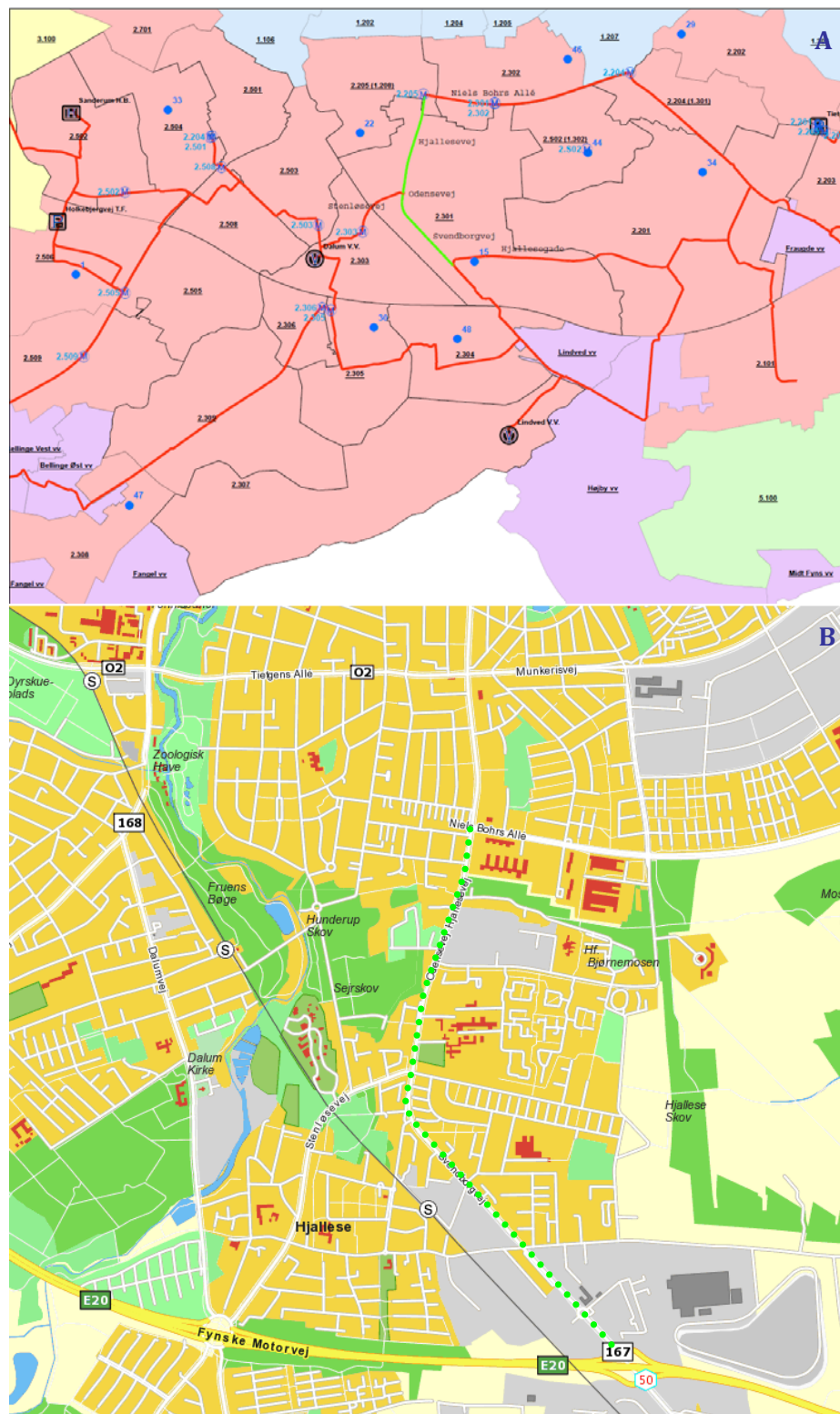


Figur 70: Sammenhæng imellem turbiditet og kimal22, kimal20 og kimal-37 under målekampagne ved afgang forfilter 1, anlæg 2, Sjølsø vandværk, Nordvand A/S d. 25/6-2010. Åbne symboler angiver <0,3 CFU/mL. Bemærk logaritmiske akser.



## 5.2 Idriftsættelse af ledningsstrækning

VandCenter Syd A/S tog i januar 2010 en ledningstrækning i drift, der havde været ude af drift i et års tid i forbindelse med omlægning af trykzoner. Den 500 mm BON ledning i zone 2 dækker en ca. 3 km strækning fra Hjallesgade ad Svendborgvej, Odensevej og Hjallesvej, til Niels Bohrs Allé, hvor den ender i brønd 2.205 på hjørnet af Hjallesvej og Niels Bohrs Allé (Figur 71).



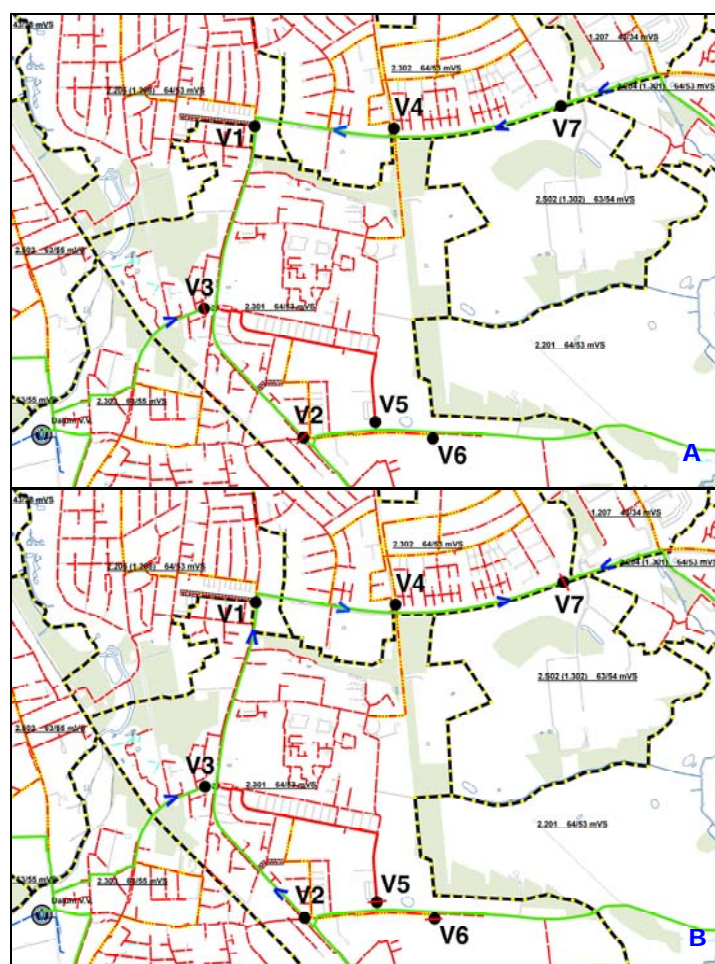
Figur 71: Oversigtskort med angivelse af ledningsstrækning, der har været ude af drift et år. A: Ledningsstrækningens placering (markeret med grønt) i zone 2 af hoved-ledningsnettet,

VandCenter Syd A/S. 'M' angiver placering af målerbrønde  
 B: Ledningsstrækningens placering (markeret med stiptet grøn linje) i bybilledet.

Forud for idriftsættelse blev ledningen skyllet igennem en måned fra nord mod syd med vand fra ledningsnettet. Løbende analyser af skyllevandet bekræftede, at kimtallene lå under kvalitetsværdierne før idriftsættelse af ledningen (Tabel 11). Den sidste uge før idriftsættelse stod ledningen med et minimalt flow.

Tabel 11: Analyse af skyllevand udtaget ved ledningsstrækningens sydlige ende ved Hestehaven/Svendborgvej. Fremhævet værdi angiver overskridelse af grænseværdien (angivet i {}). i.m.: ikke målt.

Dato	Coliforme [#/100 mL] {<1/100 mL}	<i>E. coli</i> [#/100 mL] {<1/100 mL}	Kimtal-22 [CFU/mL] {200 CFU/mL}	Kimtal-37 [CFU/mL] {20 CFU/mL}
18-12-2009	<1	<1	<b>240</b>	5
22-12-2009	i.m.	i.m.	160	18
5-1-2010	<1	<1	43	2



Figur 72: Ventilindstillinger før (A) og efter (B) ibrugtagning af ledningsstrækning, VandCenter Syd A/S.

Ledningsstrækningen blev idriftsat ved sidste fase af omlægning af trykzoner i bydelen 27/1-2010, hvilket omfattede ændring af 7 ventilindstillinger i området.

Første (V1) ventiljustering åbnede den nordlige ende af ledningsstrækningen ved Niels Bohrs Alle, anden (V2) og tredje (V3) ventiljustering åbnede for tilløb til ledningsstrækningen ved Svendborgvej og Stenløsevej, og fjerde (V4) og syvende (V7) ventiljustering sikrede et stort tvunget flow mod nord (Figur 72). Ved ibrugtagningen blev strømningsretningen i ledningsstrækningen således vendt i forhold til skylleretningen. Før idriftsættelse af ledningsstrækningen stammede vand i brønd 2.205 hovedsagligt fra de sydvestlige liggende vandværker, mens det efter ibrugtagningen formentlig i højere grad vil stamme fra de østlige beliggende vandværker.

### 5.2.1 Målekampagne

Vandkvalitetsparametre blev monitoreret under idriftsættelse af ledningen. I brønd 2.205 monitoreredes flow, tryk samt temperatur rutinemæssigt med on-line sensorer. Da der var begrænset plads i brønden blev de øvrige parametre monitoreret og vandprøver udtaget ved nærmeste tappested på Odense Teknikum. Fra målerbrønd 2.205 ledes vand igennem ca. 70 meter 90 mm PE ledning, hvorfra ca. 50 m stikledning i 80 mm gråt støbejern går til kælderen på Odense Teknikum (Figur 73). Lige efter vandmåleren i kælderen på Teknikum blev der monteret tre taphaner, første hane til udtag af vandprøver, anden hane tilkoblet sensortavle og tredje hane til at skabe et minimum forbrug gennem stikledning indstillet på et konstant flow på 800 L/time (Figur 74A).





Figur 73: Flowretning omkring brønd 2.205 og prøvetagningssted på Odense Teknikum før (A) og efter (B) idriftsættelse af ledningsstrækningen.

Sensortavlen (Gustaf Fagerberg A/S, Figur 74B) monitorerede on-line turbiditet, ilt, pH, ledningsevne samt temperatur (Figur 74B). Forbrugsflow samt flow igennem sensortavlen blev indstillet om eftermiddagen d. 26/1-2010. Om morgenen d. 27/1-2010 før åbning af V1 blev der udtaget 3 vandprøver med 25 min interval, og under/efter justeringer af ventiler blev 24 vandprøver med 3-15 min interval vurderet efter sensorsignalet over 4 timer. Den efterfølgende morgen blev der udtaget yderligere 4 vandprøver. Vandprøverne blev udtaget ved et flow på ca. 2,3 L/min. Forud for første prøve løb prøvetagningshanen 15 min og løb efterfølgende mindst 2 min før hver enkelt prøvetagning.



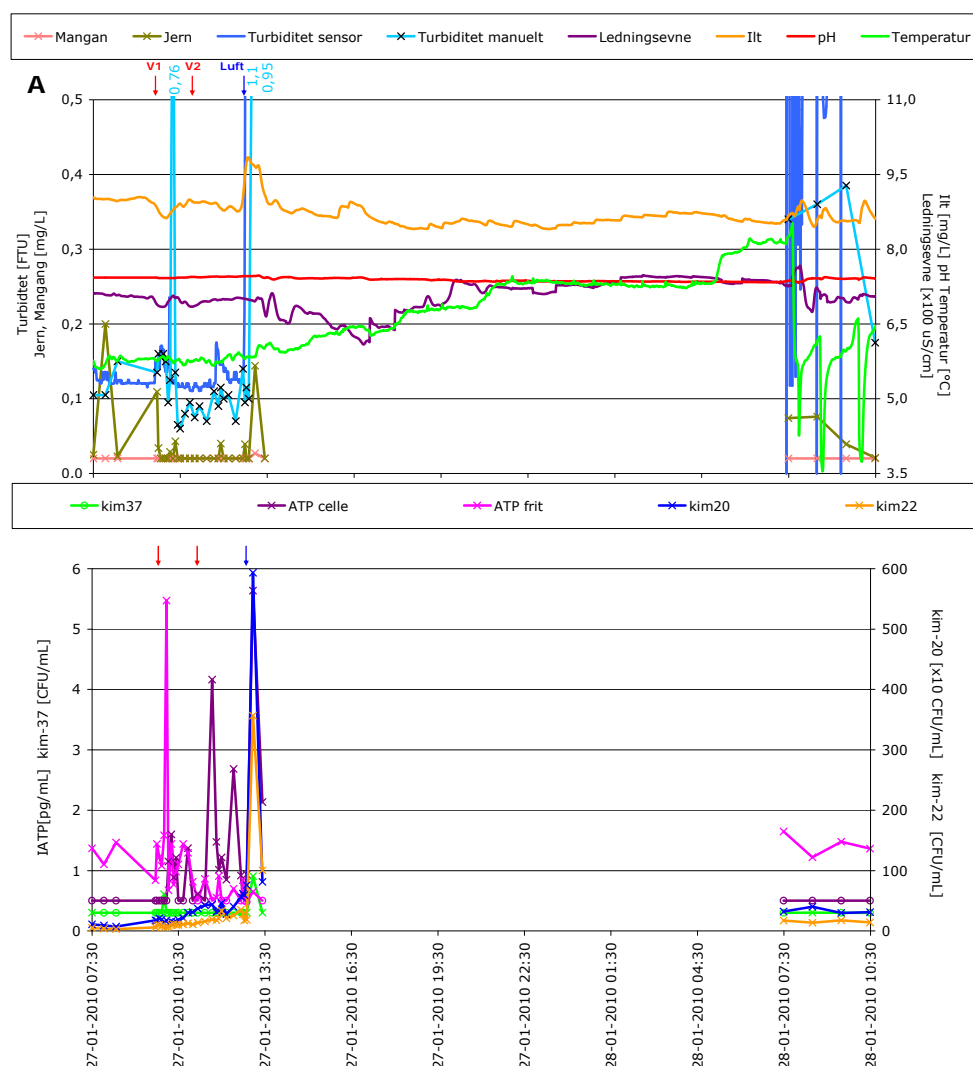
Figur 74: Udstyr til on-line monitoring. A: Sensortavle til monitoring af turbiditet, ledningsevne, pH, ilt og temperatur. B: Tre hane monteret efter vandmåler, første hane til vandprøvetagning, anden hane vandforsyning til sensortavlen og tredje hane til at skabe forbrug igennem stikledning.

### 5.2.2 Resultater

Sensormålingerne viste et relativt stabilt niveau indtil d. 27/1-10 kl. 12:40, hvor der kom større mængder luft i vandet ved taphanen (mælkede vandprøver). Luften blev fanget i sensorerne, og især turbiditetssensoren kunne ikke give korrekt aflæsning (værdier aflæst var over sensorens logningsinterval på 9 NTU). De øvrige målinger syntes også påvirket, idet temperaturen steg 3°C over natten og viste nogle kraftige udsving samtidigt med kraftige udsving på iltensoren og turbiditetssensoren om formiddagen d.28/1-2010 (Figur 75A), Målingerne varierede i langt højere grad over natten med luft fanget i sensorerne end foregående nat uden (data ikke vist). Vandprøverne blev derfor suppleret med manuelle turbiditetsmålinger i laboratoriet – de to turbiditetsmålinger gav ikke helt enslydende resultater, men gav samme indikation af niveau (for de prøver, hvor der ikke var fanget luft i turbiditetssensoren).

Om morgen d. 27/1-2010 før ventiljusteringer lå sensormålingerne på et stabilt niveau (turbiditet  $\approx 0,11$ - $0,13$  NTU; ilt  $\approx 9,0$  mg/L; ledningsevne  $\approx 700$  mS/cm; temperatur  $\approx 5,7^{\circ}\text{C}$  - Figur 76A). Efter åbning af V1 kl. 9:35 var der samtidig små udslag på turbiditet, ledningsevne og ilt over en ½ time (Figur 76 – turbiditet op til  $0,16$  NTU, ilt ned til  $8,6$  m/L og ledningsevne ned til  $685$  mS/cm), hvorunder der var enkelte forhøjede jernværdier. Efter åbning af V2 kl. 10:55 kom der efterfølgende mindre udslag i turbiditeten kl. 11:45 (op til  $0,17$  NTU) sammenfaldende med en enkelt let forhøjet jernværdi. Kl. 12:40 kom der luft i vandet ved taphanen, der formentlig havde løsrevet partikler og biomasse fra ledningsnettet, hvormed turbiditeten steg til  $1,1$  NTU (målt med manuelle turbiditetsmåler). Dette kunne ligeledes ses som forhøjet

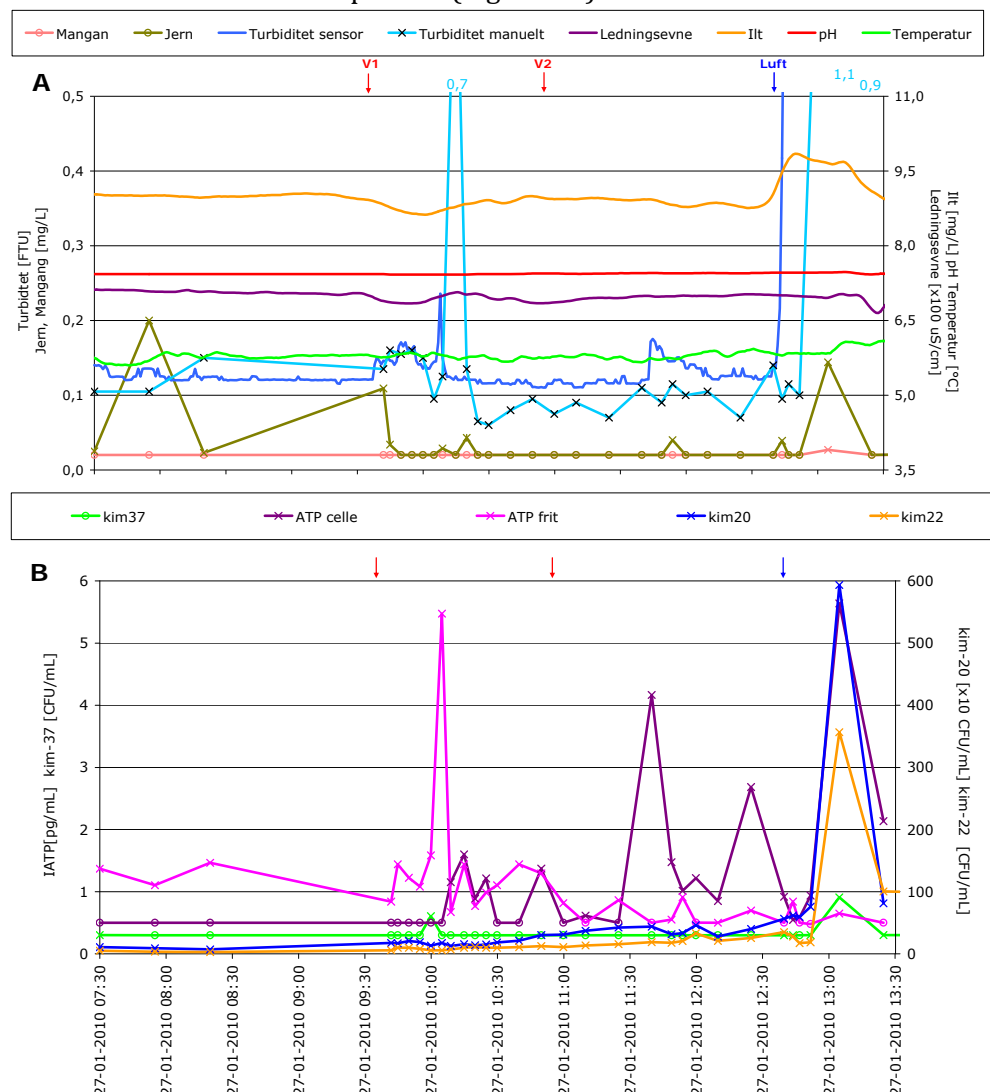
manganniveau (0,03 mg//L) og jernniveau (0,14 mg/L). Turbiditet, jern og mangan nåede et niveau svarende til udgangspunktet i løbet af næste formiddag (Figur 75A). Luften i vandet medførte ligeledes en top i iltkoncentration (9,7 mg/L) af en times varighed, hvilket indikerede, at luften var skyllet ud af ledningnettet i løbet af en times tid (Figur 76A).



Figur 75: Sensormålinger og Fe/Mn (A) og mikrobiologiske parametre (B) fra målekampagnen over idrift sættelse af ledningsstrækning, VAndCenter Syd AS/. Åbne symboler angiver, at værdien var under analysens kvantifikationsgrænse (Mn = 0,04 mg/L) eller detektionsgrænse (kimtal-37 = 0,3 CFU/mL, ATP = 0,5 pg/mL). Bemærk enhed for flow, ledningsevne og kimtal-20. V1 og V2 angiver tidspunkt for åbning af ventil 1 og 2. 'Luft' indikere tidspunkt, hvor der kom luft i vandet ved taphanen. Se dag 1 forstørret på Figur 76.

Før ventiljusteringerne om morgen d. 27/1-2010 var alle mikrobiologiske parametre på lave niveauer: Kimtal-37 < 1 CFU/mL, kimtal-22 < 10 CFU/mL, kimtal-20 < 200 CFU/mL, ATP<sub>Celle</sub> < 0,5 pg/mL, ATP<sub>Frit</sub> < 1,5 pg/mL (Figur 76B). Detektionsgrænsen for ATP var 0,5 pg/mL med en kvantifikationsgrænse på 1,5 pg/mL, så der var tale om generelt meget lave ATP-værdier over hele perioden, med værdier < 1,6 pg/mL på nær i ét tilfælde for ATP<sub>Frit</sub> og i fire tilfælde for ATP<sub>Celle</sub>. Afvigelsen i ATP<sub>Frit</sub> faldt sammen med en stigning i turbiditet efter åbning af V1 og indikerede død biomasse, som man vil forvente optræde i stillestående vand. Højere værdier for ATP<sub>Celle</sub> (max 5,6 pg/L) blev set i forbindelse med stigende kimtal. Kimtal-37 var generelt < 1

CFU/mL og var kun på 1 CFU/mL efter åbningen af V1 og i forbindelse med, at der kom luft i vandet ved taphanen (Figur 76B).



Figur 76: Sensormålinger og Fe/Mn (A) og mikrobiologiske parametre (B) fra målekampagnen over idrift sættelse af ledningsstrækning, VAndCenter Syd AS/. Åbne symboler angiver, at værdien var under analysens kvantifikationsgrænse (Mn = 0,04 mg/L) eller detektionsgrænse (kimtal-37 = 0,3 CFU/mL, ATP = 0,5 pg/mL). Bemærk enhed for flow, ledningsevne og kimtal-20. V1 og V6 angiver tidspunkt for åbning af ventil 1 og 6. 'Luft' indikere tidspunkt, hvor der kom luft i vandet ved taphanen. Figur er forstørrelse af dag 1 fra Figur 76.

Efter åbning af V1 steg kimtal-20 og kimtal-22 støt frem til, at der kom luft i vandet ved taphanen; kimtal-20 overskred dog ikke 500 CFU/mL og kimtal-22 ikke 40 CFU/mL. Med luft i vandet steg kimtal-20 og kimtal-22 kraftigt, hvorved grænseværdien for kimtal-22 blev overskredet (357 CFU/mL) i enkelt prøve (Figur 76B). Alle mikrobiologiske parametre var nede på udgangsniveauet ved målingerne næste formiddag (Figur 75B). På trods af øgede kimtal, blev der ikke detekteret coliforme eller *E. coli* i nogle af de udtagne prøver.

Måleresultaterne viste, at der efter åbning af V1 gik vand af anden kvalitet igennem systemet, evt. blev noget materiale (biomasse, partikler) frigivet ved ventilåbningen. Efter åbning af V2 gik der enten en anden vandtype igennem systemet til taphanen, eller mindre mængder luft forårsagede mindre løsrivning af materiale fra rørsiderne til vandet. Da luften nåede taphanen, var

det sammen med større mængder løsrevet materiale med bakterier og udfældninger.

Der var således sammenhæng imellem udslag i sensormålinger og forøgede mikrobielle værdier, men (særlig på grund af de generelt meget lave niveauer af alle parametre) kunne der ikke opstilles en simpel kobling imellem sensormålinger og mikrobiologiske parametre.

### 5.3 Diskussion af sensorer og mikrobiologisk kvalitet

Analyse af sammenhørende sensormålinger og mikrobiologiske parametre gav ikke en direkte kobling imellem mikrobiologisk vandkvalitet og sensormålinger. Dvs. at man ikke kan – selv indenfor et specifikt system - relatere fx en given turbiditetsværdi til en given kimtalsværdi. Det vil derfor ikke være muligt at fastsætte en grænse for fx turbiditet, hvorunder man kan garantere den mikrobiologisk vandkvalitet. Omvendt kan det dog fastslås, at en pludselig ændring i signalet fra sensorerne repræsenterer en eller anden type ændring i ens system, som alt andet lige vil udgøre en risiko for den mikrobiologiske vandkvalitet.

## 6 Samlet diskussion

Indholdet af det kommende reviderede drikkevandsdirektiv kendes endnu ikke, men det forventes, at det vil blive baseret på Water Safety Plans-principper, som forudsætter et indgående kendskab til forsyningsnettet og de enkelte processer på vandværkerne.

Dette projekts vandforsyningerne har først og fremmest taget on-line sensorer i brug for at opbygge erfaring med, hvad de viser, og hvordan man kan bruge måledata. På flere af forsyningernes værker er on-line turbiditetssensorer blevet brugt til at optimere filterdriften og returskylsprocedurer.

On-line målingerne følges i den daglige drift ude i forsyningerne, men bruges fortsat ikke systematisk til overvågning, kontrol og styring i forsyningerne. Der hersker derfor fortsat usikkerhed om hvilke sensormålinger og driftsinformationer, der arkiveres og hvilke, der bør arkiveres. Derved går information om årsagssammenhænge ofte tabt og begrænser anvendeligheden af sensormålingerne som værktøj. Arkiveres målinger kun som værdier midlet over en time eller et døgn, mistes information om tidsmæssig udstrækning og størrelse af udslag i sensormålinger. Analyse af tidsserier indikerede, at værdier midlet over 5 min logningsperioder giver acceptable balance mellem datamængde og information om tidsmæssig placering og størrelse af signal.

For få det fulde udbytte af sensormålinger til overvågning og kontrol af processer, ved fx at indlægge dynamiske alarmer for de forskellige parametre, kræves et godt kendskab til niveauet for den normale driftssituation. For at opnå dette og kunne identificere afvigelser fra normaldriften vil det være nødvendigt løbende at sammenkoble sensormålinger og årsagssammenhænge. Dette vil oftest ske ved, at driftspersonalet i det daglige holder øje med sensormålinger, men for at opbygge dokumentation og forankre erfaring, bør dette være et automatisk forløb via en software funktion. Sådant software er enten endnu ikke tilgængelig eller også ligger det som en funktion i SRO-systemer, der blot ikke benyttes. Sammenfatningerne kunne fx genereres som gentlige rapporteringer til driftsledelsen.





## 7 Konklusion

Fem af landets store vandforsyninger: Københavns Energi A/S, Nordvand A/S (Gentofte delen), VandCenter Syd A/S, Århus Vand A/S og Esbjerg Forsyning A/S, der tilsammen repræsenterer omkring en fjerdedel af landets indvinding, har deltaget i projektet.

I forsyningerne sidder sensorer til monitorering af vandkvalitetsparametre fortrinsvis på vandværkerne, hvor der i de fleste tilfælde kun findes et enkelt eksemplar af den pågældende sensortype: Turbiditet (15 værker), ilt (4 værker), ledningsevne (2 værker) og pH (2 værker), hvilket fortsat må betragtes som et relativt beskedent antal. I brønde på ledningsnettet er der næsten udelukkende installeret sensorer til at monitorere driftsparametre som flow, tryk og temperatur – i nogle forsyninger i alle brønde, i andre i en mindre andel. De anvendte sensorer dækker flere forskellige fabrikater, og den anvendte logningsintensitet varierer imellem forsyninger. Der er ligeledes stor forskel på, hvordan forsyningerne gemmer sensormålinger historisk, og hvor tilgængelige disses måledata er. Udover de i 2009 indrapporterede eksisterende sensorer forventer alle projektets forsyninger at udbygge deres sensorpark i de kommende år.

Analysen af tidsserier af sensormålinger fra vandværker viste, at udslag i sensormålinger under normaldrift kunne knyttes til en driftsmæssig årsag (fx flowændring og returskyl). Det vil således være teoretisk muligt at fastlægge en forventet profil for fx turbiditetsmålinger baseret på driften. Dermed vil også afvigelser fra normaldriften kunne identificeres. Analysen viste desuden, at sensormåling-profiler påvirkes forskelligt af driftsmæssige forhold fra vandværk til vandværk, og der må derfor udfærdiges en profil for normaldriften for det enkelte værk. Turbiditetssensorer blev benyttet på alle værker, hvor on-line sensorer blev rapporteret. Øget belastning af filtrene (øget indvindingsflow) og opstart efter returskyl af filtre generelt gav anledning til toppe i turbiditetsniveauet.

Forsyninger har først og fremmest on-line sensorer for at opbygge en erfaringsbase for, hvad sensorerne viser. Indtil nu har on-line sensorerne fortrinsvis været anvendt til kvalitetskontrol (overvågning) af vandkvaliteten, men sensorerne har i flere tilfælde været brugt ad hoc til at optimere processer (fx filterdrift, returskylleprocesser og indkøring af luftningsenheder). Fremover forventes sensorer i højere grad også at blive brugt til styring af processer.

On-line sensorer til monitorering af flow, tryk og temperatur i forsyningernes ledningsnet udgør i dag et stærkt værktøj til driftskontrol af ledningsnettet (fx lækagesøgning). Fremtidig brug af sensorer til monitorering af ledningsevne og turbiditet på ledningsnettet vil gøre det muligt, at følge afvigende vandkvalitet fra vandværket (fx forhøjet turbiditet) samt forureninger i større målestok ud igennem ledningsnettet, og opdage uregelmæssighed (fx større forureninger) opstående ude på ledningsnettet.

Målekampagner med sammenligning af sensormålinger og analyse af mikrobiologiske parameter angav ikke en direkte korrelation imellem

sensormålinger og mikrobiologisk vandkvalitet. Der kan således ikke fastsættes en værdi for fx turbiditet, hvorunder man kan garantere den mikrobiologiske vandkvalitet. Omvendt indikerer en pludselig ændring i sensorsignal en ændring i systemet, der kan udgøre en risiko for den mikrobiologiske drikkevandskvalitet. Der var ved de udførte målekampanjer dog generelt tale om meget lave mikrobiologiske niveauer.

On-line målingerne følges i den daglige drift af driftspersonalet ude i forsyningerne, men bruges fortsat ikke systematisk som værktøj til overvågning og kontrol i forsyningerne, og der er derfor fortsat usikkerhed om hvilke sensormålinger, der arkiveres og hvilke, der bør arkiveres. For at få det fulde udbytte af on-line sensorer til kontrol og overvågning, kræves et godt kendskab til niveauet for den normale driftssituation, så signalet kendes, og afvigelser kan identificeres. Dette kræver, at målingerne løbende følges af driftspersonalet og kobles til årsagshændelser, men for at forankrer erfaringer og opbygge dokumentation er det nødvendigt med løbende sammenfatninger. Af hensyn til ressourcer og tilgængelighed bør dette være et automatisk forløb via en software funktion, fx som ugentlige rapporter til driftsledelsen – sådan software er enten endnu ikke tilgængelig eller også ligger det som en funktion i SRO-systemer, der i dag blot ikke anvendes.

## 8 Referencer

Amirtharajah,A.; Wetstein, D.P. (1980) Initial degradation of effluent quality during filtration. J. AWWA 72:9:518-524

BEK (2007) Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg, BEK nr. 1449

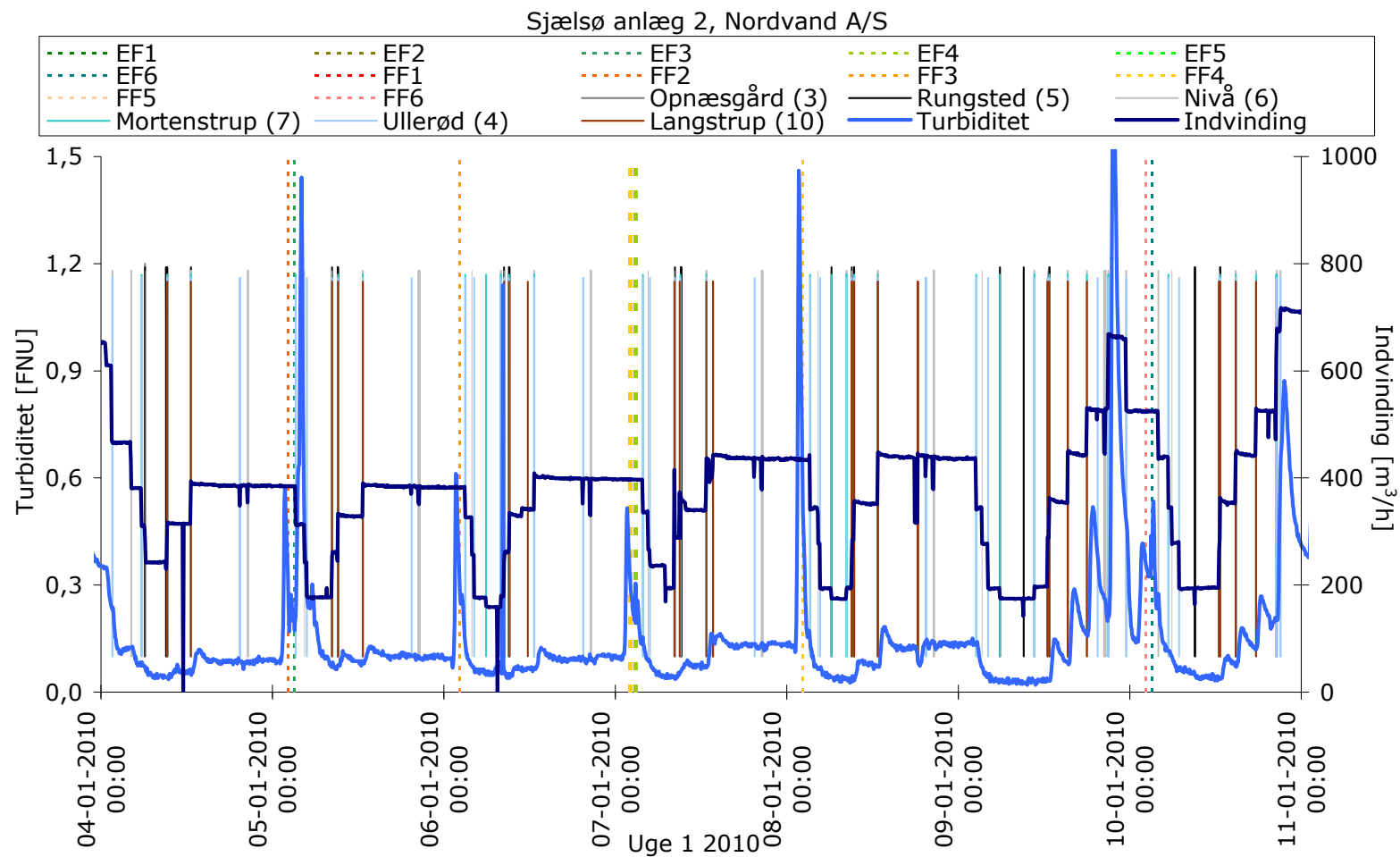
Boe-Hansen, R.; Albrechtsen, H.-J.; Arvin, E.; Spliid, H. (2003) Mikrobielle forureninger – vi ser kun toppen af isbjerget. danskVAND, 71:2:86-90



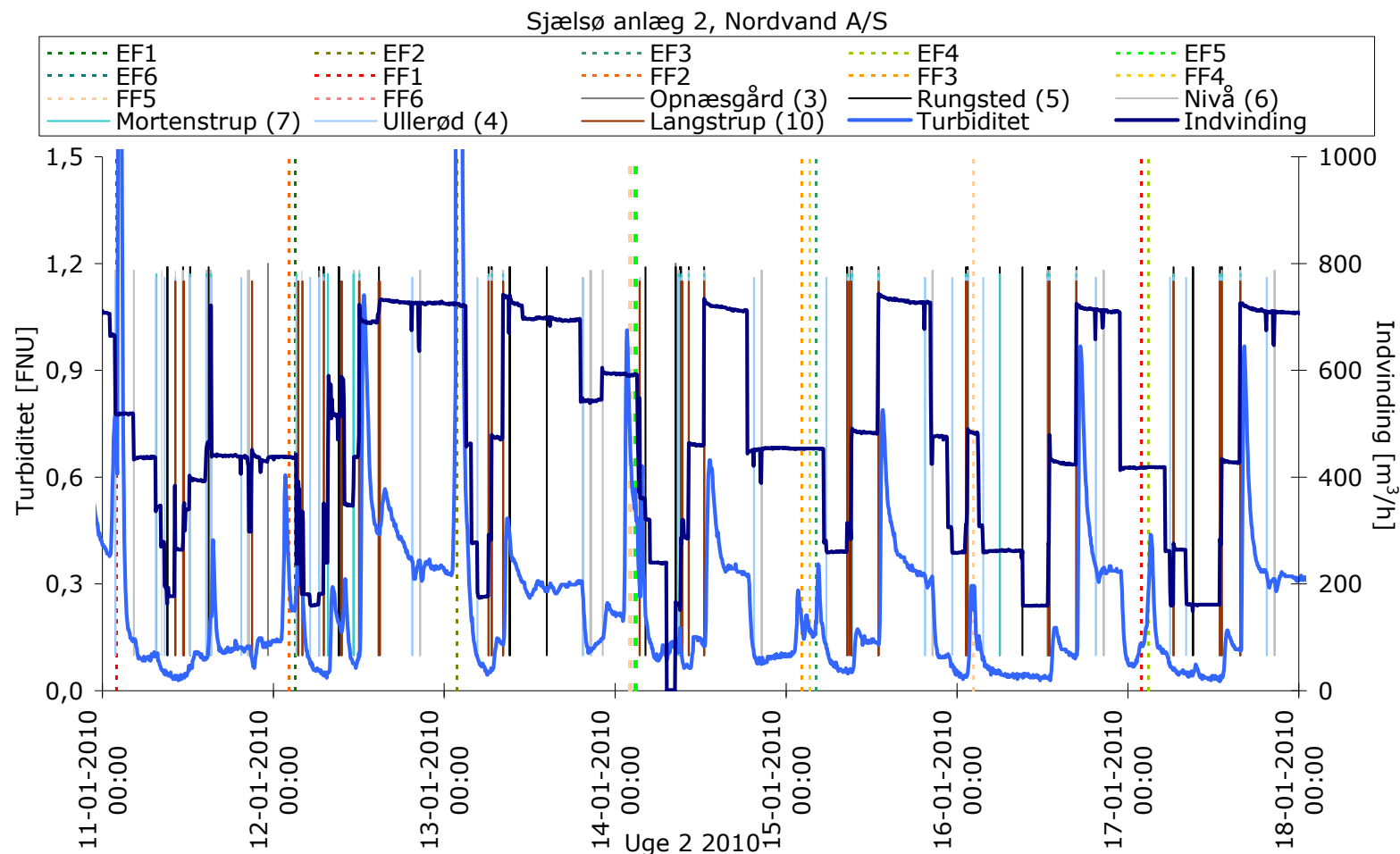
# Bilag A: Tidsserier Sjælsø vandværk,

## anlæg 2, Nordvand A/S

Modsvarende Figur 45-Figur 52  
med angivelse af boringsopstart

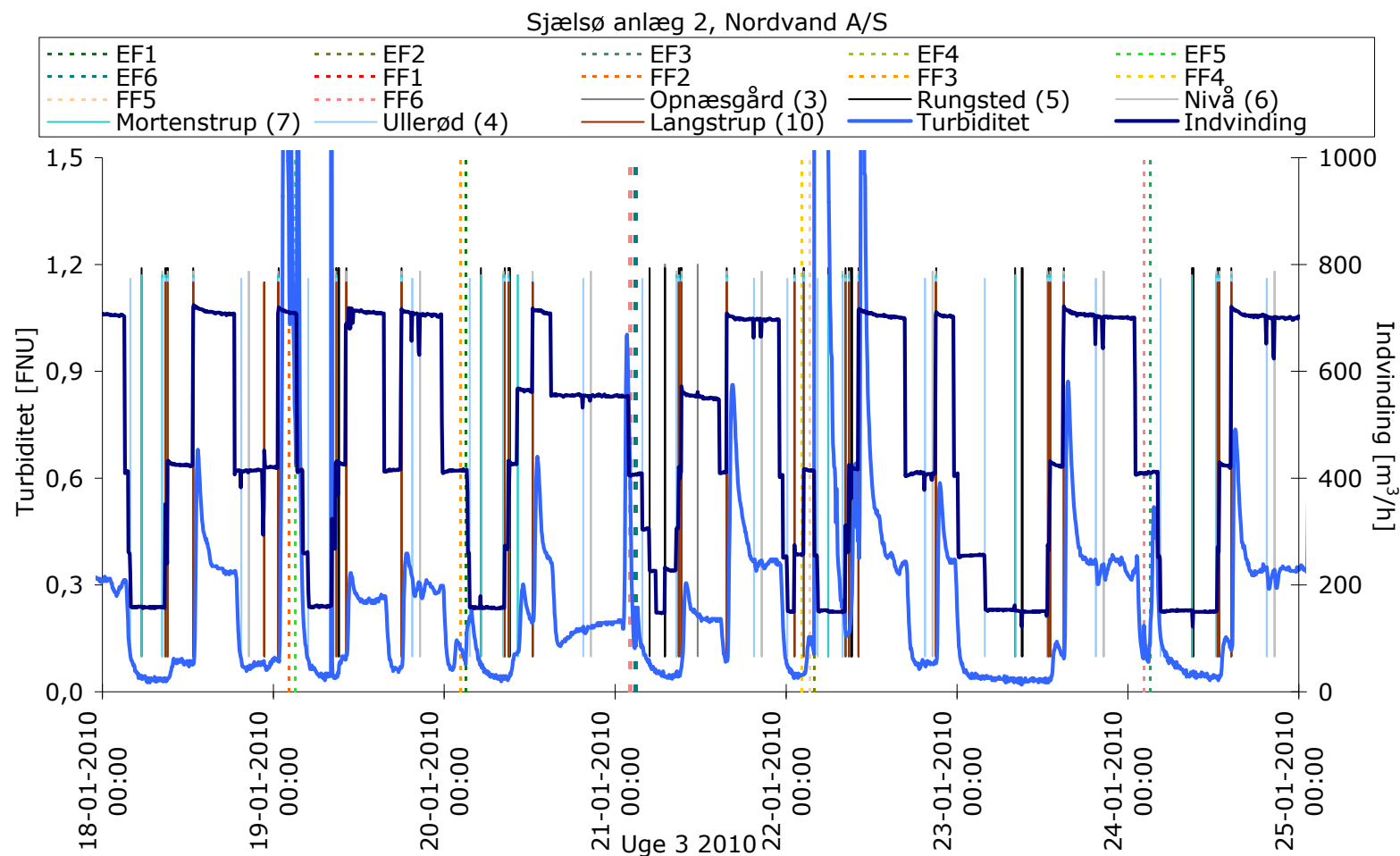


Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 1 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Fremhævet opstart angiver returskyl af filtret efter 1 uge ude af drift. Navne angiver borerer var respektive kildepladser hvor tallet i () angiver antallet af borerer på den enkelte kildeplads. Turbiditetsensor placeret efter efterfiltrene.

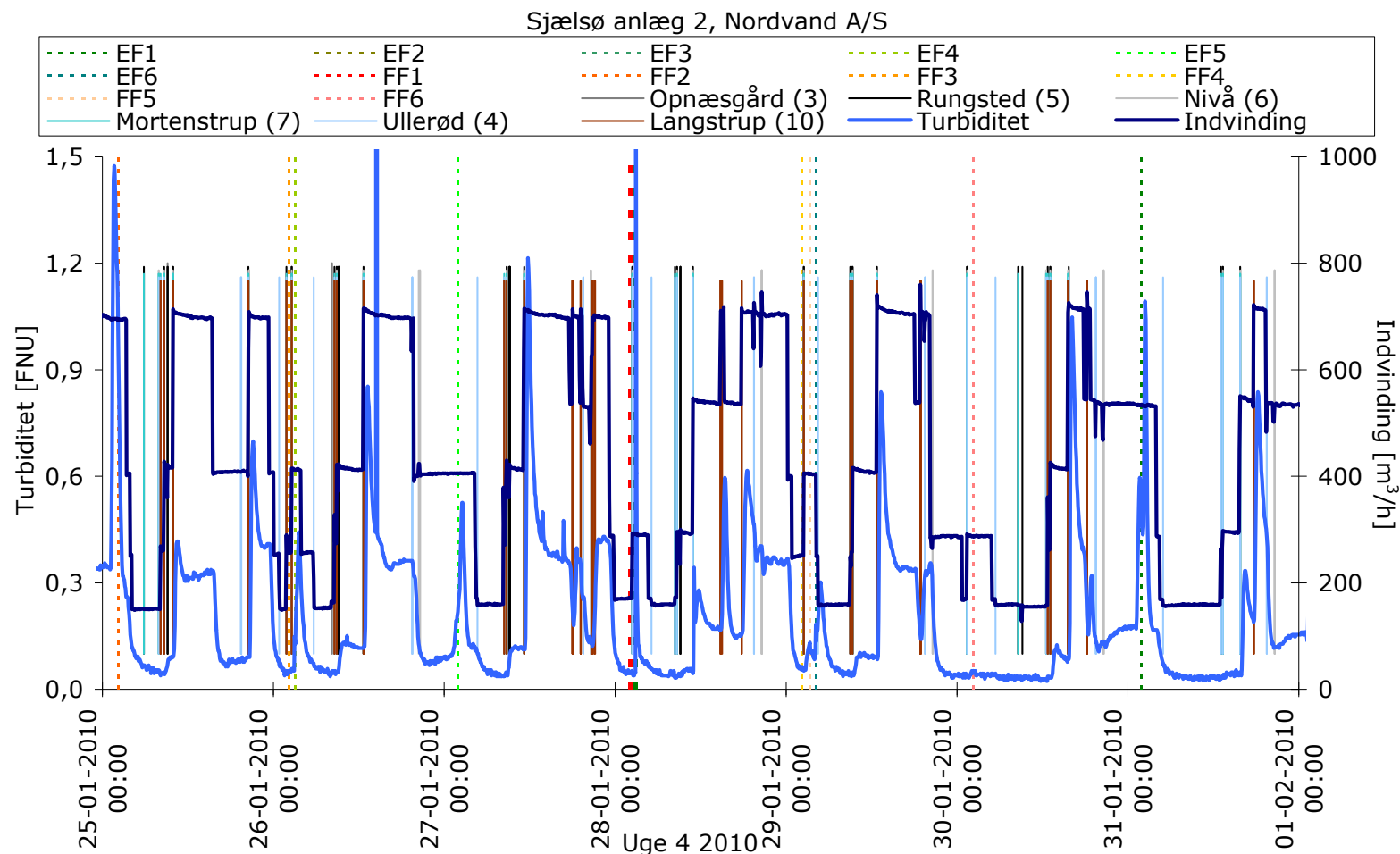


Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 2 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Fremhævet opstart angiver returskyl af filtret efter 1 uge ude af drift. Navne angiver borerer var respektive kildepladser hvor tallet i () angiver antallet af borerer på den enkelte kildeplads. Turbiditetssensor placeret efter efterfiltrene.

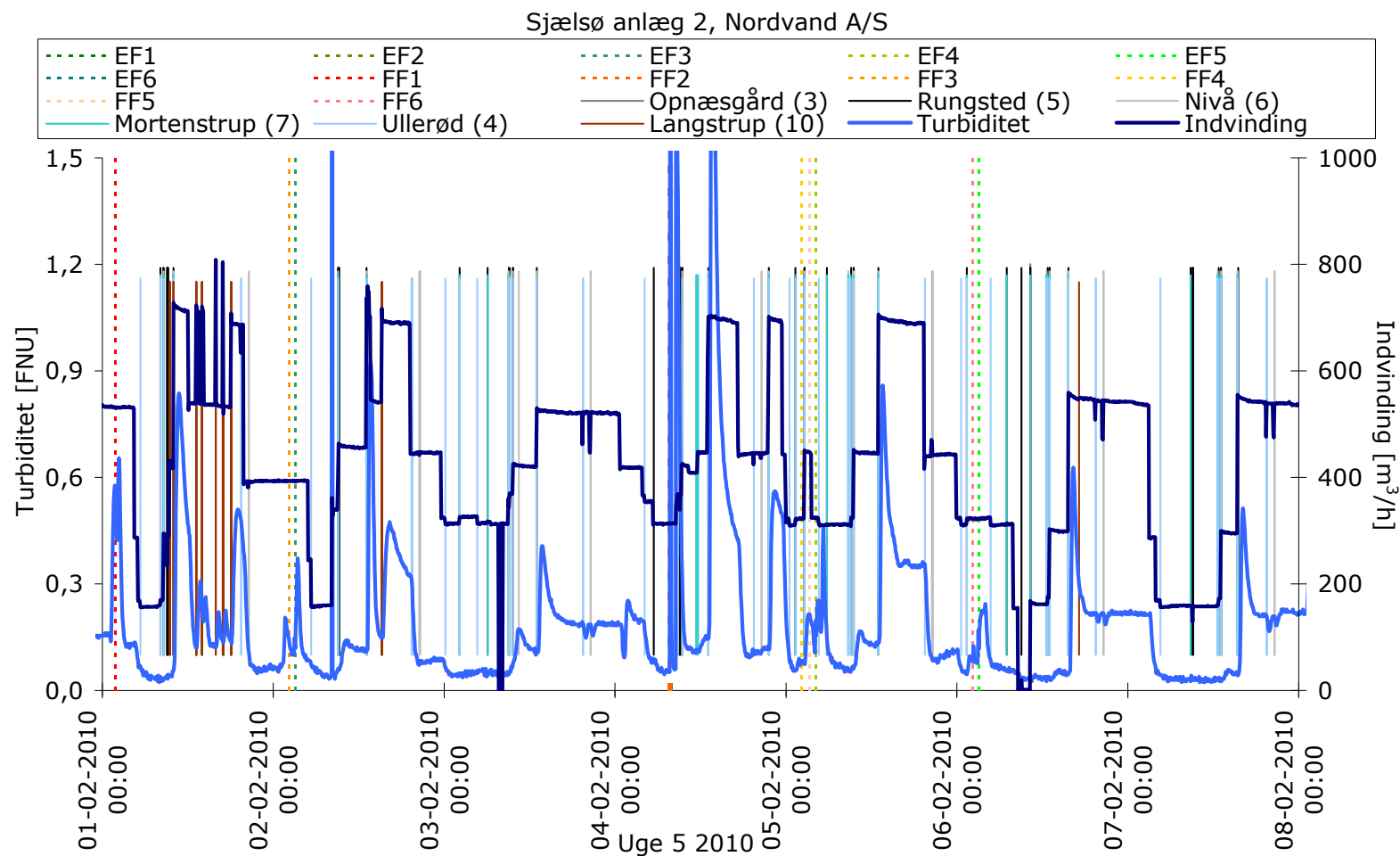




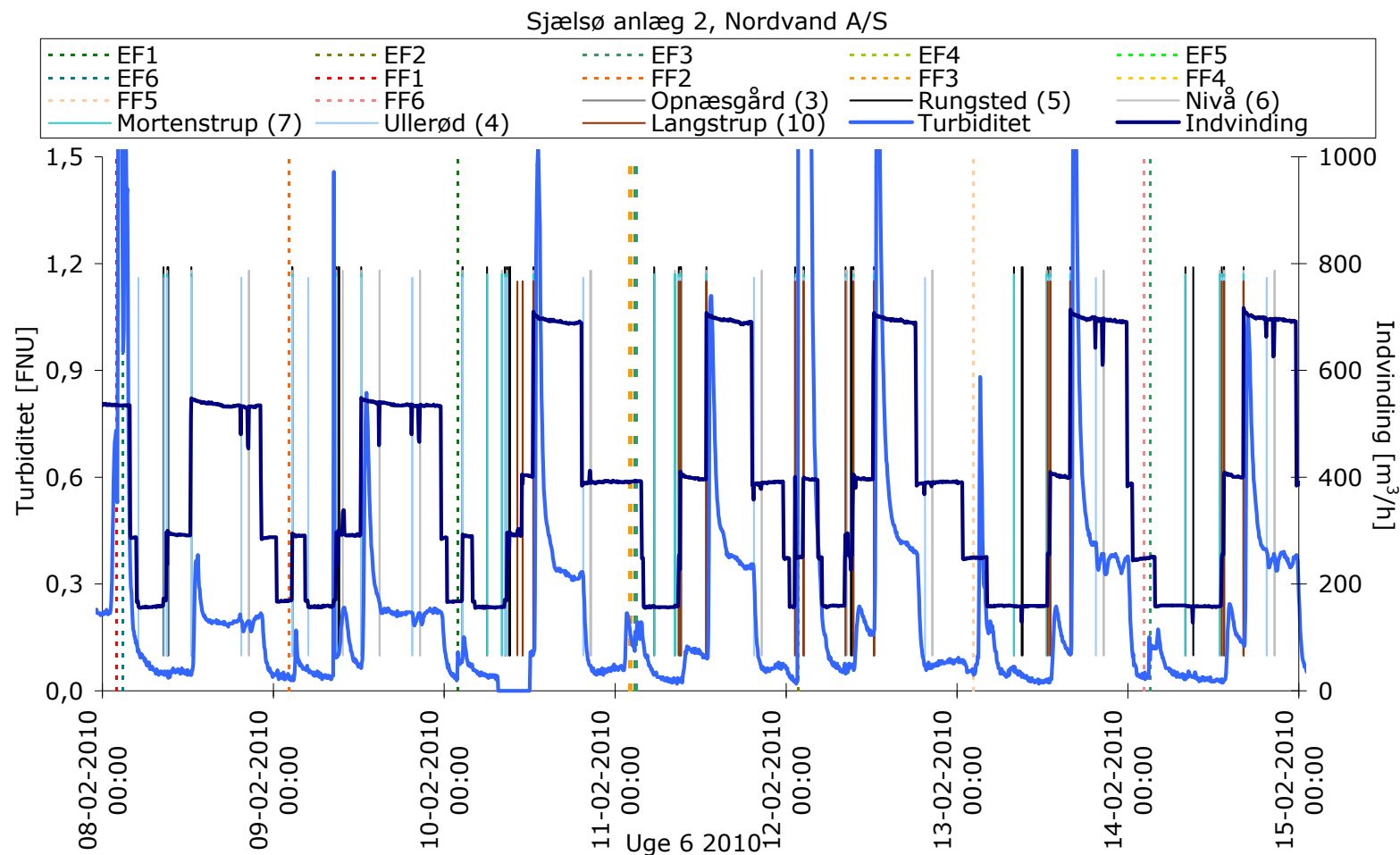
Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 3 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Fremhævet opstart angiver returskyl af filtret efter 1 uge ude af drift. Navne angiver borerer var respektive kildepladser hvor tallet i () angiver antallet af borerer på den enkelte kildeplads. Turbiditetssensor placeret efter efterfiltrene.



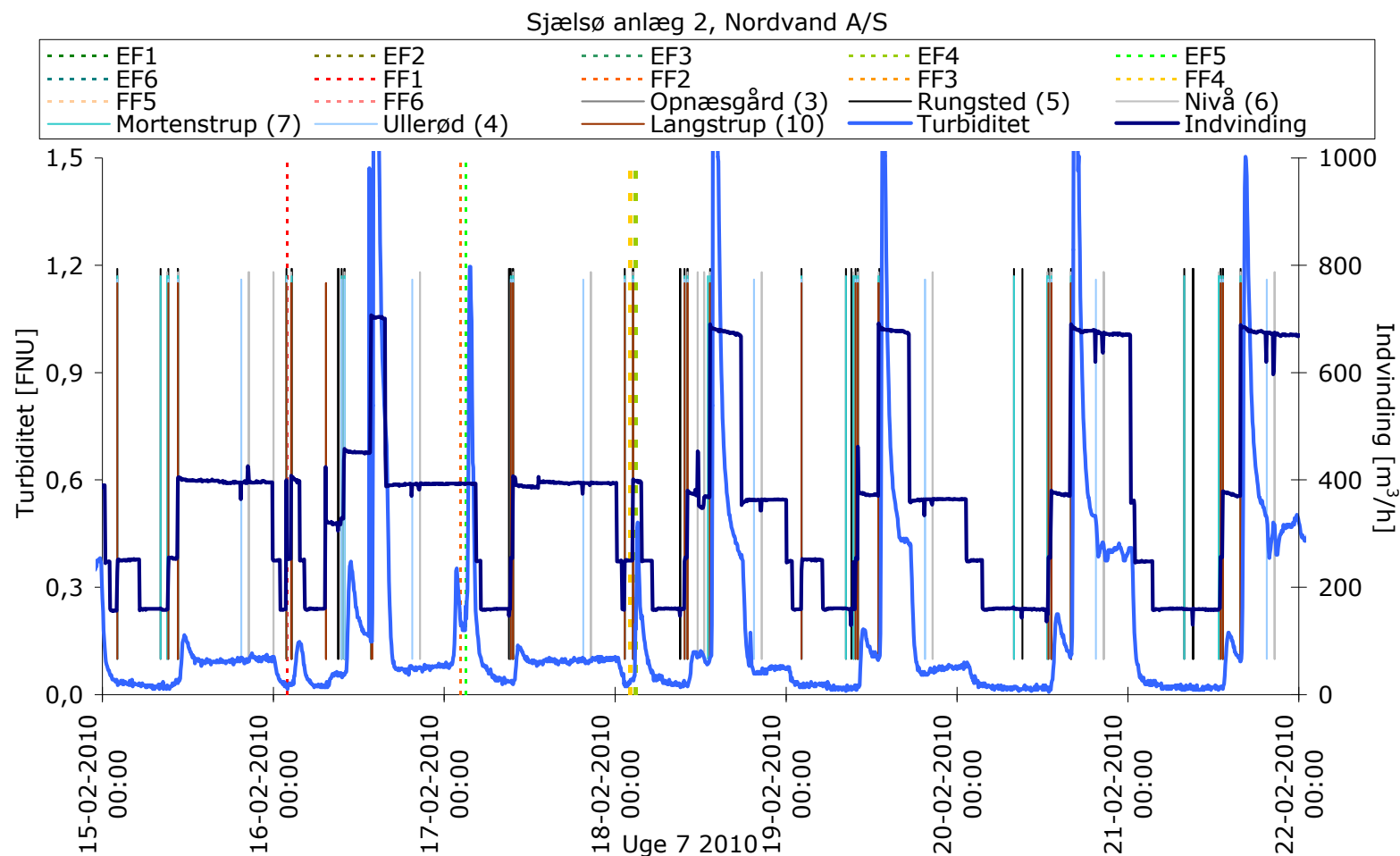
Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 4 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Fremhævet opstart angiver returskyl af filtret efter 1 uge ude af drift. Navne angiver borer var respektive kildepladser hvor tallet i () angiver antallet af borer på den enkelte kildeplads. Turbiditetsensor placeret efter efterfiltrene.



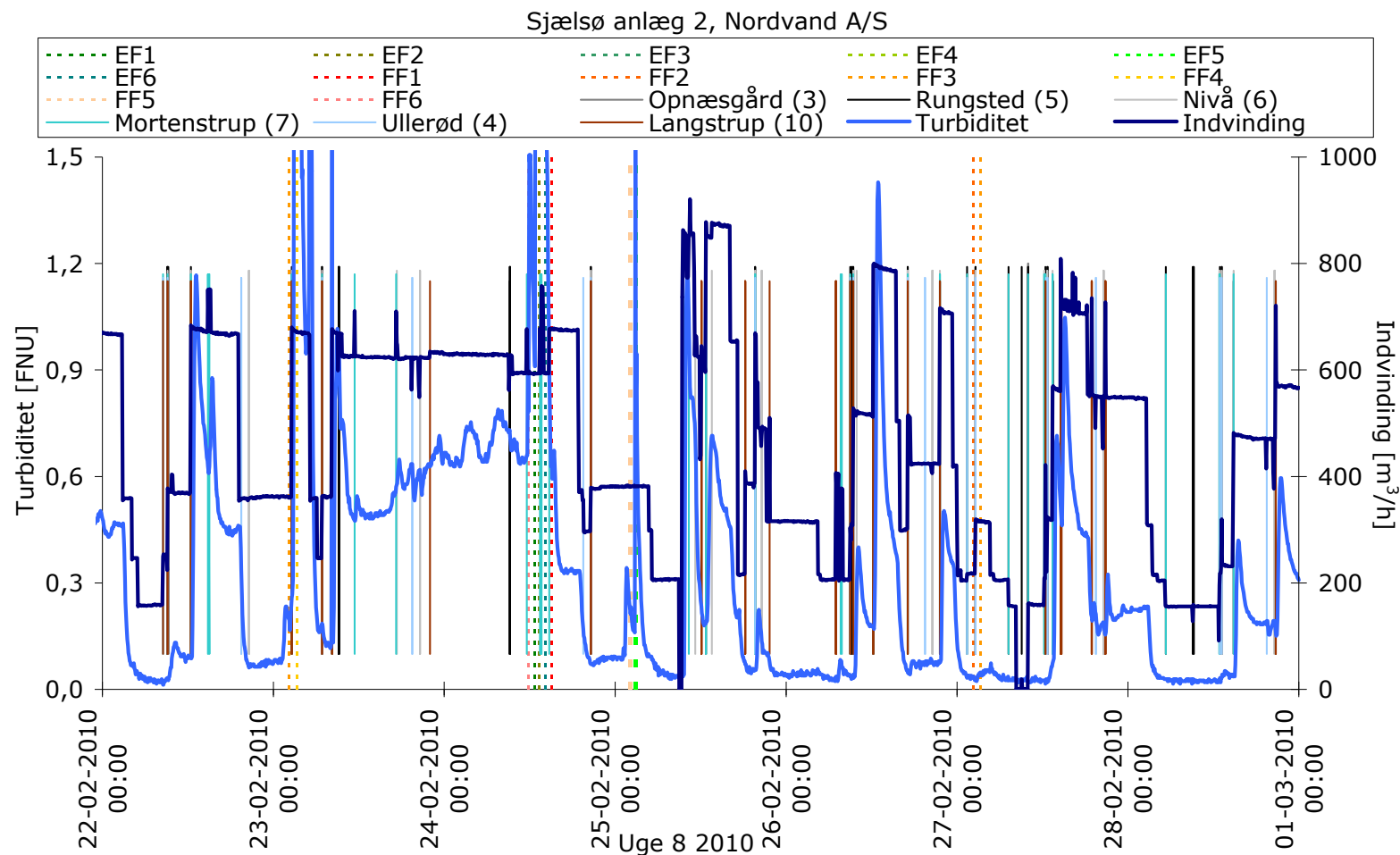
Turbiditetsmålinger som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 5 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Fremhævet opstart angiver returskyl af filtret efter 1 uge ude af drift. Navne angiver boringer var respektive kildepladser hvor tallet i ( ) angiver antallet af boringer på den enkelte kildeplads. Turbiditetsensor placeret efter efterfiltrene.



Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 6 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Fremhævet opstart angiver returskyl af filtret efter 1 uge ude af drift. Navne angiver borerer var respektive kildepladser hvor tallet i () angiver antallet af borerer på den enkelte kildeplads. Turbiditetsensor placeret efter efterfiltrene.



Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 7 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Fremhævet opstart angiver returskyl af filtret efter 1 uge ude af drift. Navne angiver borerer var respektive kildepladser hvor tallet i () angiver antallet af borerer på den enkelte kildeplads. Turbiditetsensor placeret efter efterfiltrene.



Turbiditetsmålinger og driftsdata som 5 min-værdier for Sjælsø Vandværk anlæg 2, Nordvand A/S for uge 8 2010. EF/FF# angiver tidspunkt for opstart efter returskyl af forfilter eller efterfilter nr. #. Fremhævet opstart angiver returskyl af filtret efter 1 uge ude af drift. Navne angiver borerer var respektive kildepladser hvor tallet i () angiver antallet af borerer på den enkelte kildeplads. Turbiditetsensor placeret efter efterfiltrene.